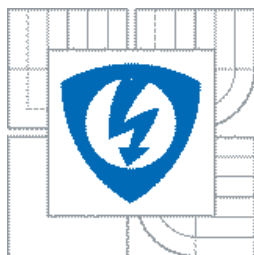


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VYSOKOMOMENTOVÉ ELEKTROMOTORY PRO POHONY NEZÁVISLÉ TRAKCE V OBORU MANIPULAČNÍ TECHNIKY

HIGH-TORQUE MOTORS FOR BATTERY OPERATED MATERIAL HANDLING TRUCKS

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Jan Höll

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

BRNO 2010

Klíčová slova

přímý pohon; synchronní motor s permanentními magnety; motor s transversálním tokem; vnější rotor; optimalizace magnetického obvodu; porovnání SMPM a TFM

Keywords

direct drive; synchronous motor with permanent magnets; transverse flux motor; outer rotor; optimization of the magnetic circuit; comparison of the SMPM and TFM

Obsah

1.	ÚVOD.....	4
2.	FORMULACE PROBLÉMŮ A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ	5
3.	PŘÍMÝ POHON NÍZKOZDVIŽNÉHO VOZÍKU	6
4.	SMPM S RADIÁLNÍM TOKEM.....	9
4.1.	NÁVRH A OPTIMALIZACE SMPM.....	9
4.2.	PROTOTYP 34-PÓLOVÉHO SMPM.....	13
4.3.	ZHODNOCENÍ NÁVRHU 34-PÓLOVÉHO SMPM	16
5.	MOTORY S TRANSVERSÁLNÍM TOKEM	17
5.1.	TFM S MAGNETY NA POVRCHU ROTORU	17
5.2.	NÁVRH A OPTIMALIZACE TFM S MAGNETY NA POVRCHU ROTORU	19
5.3.	PROTOTYP 36-PÓLOVÉHO TFM	21
5.4.	ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ TFM.....	23
6.	POROVNÁNÍ SMPM A TFM S MAGNETY NA POVRCHU ROTORU ..	24
7.	ZÁVĚR	28
	LITERATURA.....	29
	PUBLIKACE AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DIZERTAČNÍ PRACÍ	30
	CURRICULUM VITAE.....	31

1. Úvod

V posledních desetiletích s rozvojem výkonové elektroniky a vysokoenergetických permanentních magnetů došlo k velkému rozšíření střídavých elektrických strojů do aplikací vyžadující plynulejší a náročnější regulaci. Tento trend se projevil i u motorů určených pro nezávislou trakci. Oblast nezávislé trakce, do které spadají motory od výkonu několika set wattů určených pro pohon jízdních kol až po motory o výkonu v řádech set kilowattů určených pro pohon dieselelektrických kolejových vozidel, je velmi rozsáhlá a postihnout celou oblast by bylo velmi náročné.

Oblast nezávislé trakce lze rozdělit na tři velké skupiny, které se liší primárním zdrojem energie. První možností napájení trakčních motorů je pomocí elektrické energie vyrobené nejčastěji střídavým generátorem, který je poháněn spalovacím motorem. Druhou možností je napájení trakčních motorů pomocí výkonných trakčních baterií. Třetí možností je potom kombinace obou provedení, kdy spalovací motor neslouží jen jako mechanický zdroj pro výrobu elektrické energie, ale současně i jako zdroj pohybu daného stroje. V tomto případě musí být zařízení vybaveno i bateriemi s dostatečnou kapacitou. Za velkým rozvojem těchto pohonů, které se obvykle nazývají „hybridní“, stojí zejména automobilový průmysl.

Bateriové napájení se používá zejména pro pohony nižších výkonů (nejčastěji do 5 kW), kde jsou kladeny velké nároky na ekologický provoz daných strojů. Největší objem výroby v této oblasti představuje manipulační technika, menší část připadá na různé koncepty plně elektrických vozidel (skútry, jízdní kola, automobily,...).

Tato dizertační práce popisuje a hodnotí některé vhodné i méně vhodné typy synchronních motorů buzených permanentními magnety, které by mohly být použity pro přímý pohon ve vybrané bateriově napájené aplikaci manipulační techniky. Podrobněji jsou popsány vlastnosti i návrh a optimalizace synchronního motoru s radiálním a transversálním tokem. U obou motorů byly postaveny funkční vzorky, na kterých byly ověřeny teoreticky zjištěné vlastnosti. Vyrobený funkční vzorek motoru s transversálním tokem je vůbec první takový motor vyrobený v České republice a i jeden z prvních motorů v celém světě vyrobených mimo akademickou půdu.

Tato dizertační práce vznikla s podporou grantového projektu Ministerstva průmyslu a obchodu FT – TA3/120.

2. Formulace problémů a cílů jeho řešení

V oblasti manipulační techniky je v poslední době většina nových pohonů pojezdu řešena pomocí asynchronního motoru, který je mechanickou převodovkou s pevným převodovým poměrem připojen na poháněné kolo. V této oblasti, kde momentové a rychlostní požadavky na pohony pojezdu nejsou tak velké, by mohlo být toto řešení nahrazeno pohonem přímým bezpřevodovým. Náhradou asynchronního motoru s převodovkou přímým pohonem se zvýší momentové požadavky na trakční motor, důsledkem toho je zvětšení objemu motoru. Pro přímé pohony je nutné použít motory, které se vyznačují dosažitelnou vysokou hustotou momentu na jednotku objemu, vysokou momentovou přetížitelností i vysokou účinností. Tyto vlastnosti jsou charakteristické zejména pro synchronní motory buzené permanentními magnety na rotoru.

Problém byl proto formulován takto:

Navrhnout vysokomomentový motor přímého pohonu pojezdu pro aplikaci v oblasti manipulační techniky

Postupné kroky, které povedou k vyřešení problému, se dají definovat v následujících bodech:

- Analyzovat současný stav v oblasti vysokomomentových motorů
- Vybrat vhodná řešení, která by mohla být použita pro přímý pohon pojezdu
- Navrhnout a optimalizovat motor přímého pohonu tak, aby mohl být náhradou současného řešení
- Teoreticky zjištěné předpoklady ověřit při měření na konkrétním stroji

3. Přímý pohon nízkozdvížného vozíku

Do skupiny manipulační techniky lze zařadit všechny typy nízkozdvížných i vysokozdvížných vozíků. Podle primárního zdroje energie lze vozíky rozdělit na vozíky bateriové a na vozíky se spalovacím motorem. Napájení z baterií se používá výhradně pro vozíky s nižší nosností (do 3 tun) pracující v uzavřených prostorech. Bateriové vozíky jsou napájeny z trakčních baterií nejčastěji se jmenovitým napětím 24 V, 48 V nebo 80 V [14].

Většina bateriových vozíků je vybavena třemi elektrickými motorovými systémy, které zajišťují pohyb, řízení a zdvih nákladu. Pohon pojezdu je v současné době u většiny vozíků řešen asynchronním motorem s převodovkou s pevným převodovým poměrem, na jejíž hřídeli je umístěno pojezdové kolo. Na opačném konci hřídele motoru je připevněna elektromagnetická nouzová a parkovací brzda, která musí být schopna při výpadku napájení zabrzdit plně naložený vozík jedoucí maximální rychlostí.

Nároky na pohon pojezdu:

- napájení nízkým napětím a vysokými proudy v řádu několika set ampér
- vysoká účinnost v širokém rozsahu otáček
- bezchybná funkce v širokém rozsahu teplot a ve ztížených klimatických podmínkách
- nízká úroveň hluku
- nízké výrobní náklady

S nástupem nové generace pohonů začali výrobci manipulační techniky velmi ostře sledovat hluk generovaný především pojezdovým pohonem. Tento hluk vytváří jednak poháněné kolo, dále převodovka, která musí být řešena z bezpečnostních důvodů výhradně s ozubenými koly a také pojezdový motor. U asynchronních motorů velkého významu nabývá hluk elektromagnetického původu umocněný ještě širokým regulačním rozsahem motoru. Nejvýznamnějším zdrojem mechanického hluku je ale převodovka. Vzájemným odvalováním zubů prvního stupně převodovky je vytvářen nepříjemný zvuk, který při jízdě plnou rychlostí vozíků dosahuje kmitočtu řádově 1000 Hz, což je pro lidský sluch velmi nepříjemné. Různým tvarováním a přesnějším opracováním zubů lze tento hluk do určité míry omezit, ale úplně potlačit jej nelze. Úplné odstranění tohoto hluku lze dosáhnout pouze vyřazením převodovky, tedy použitím pohonu

přímého, bezpřevodového. Přímý pohon by měl splnit i všechny ostatní požadavky, které jsou kladeny na pohon pojezdu.

Požadavky na bezpřevodový pohon pojezdu:

- nižší hladina hluku než u stávajícího řešení
- průměr motoru s brzdou musí být menší než průměr pneumatiky pojezdového kola
- stejné nebo lepší dynamické vlastnosti
- stejná nebo lepší energetická bilance vozíku
- teplota motoru nesmí způsobit poškození materiálu pneumatiky kola
- celý pohon skládající se z kola, motoru, brzdy a napájecího měniče by měl být ekonomicky srovnatelný se stávajícím řešením

Pro návrh přímého pohonu pojezdu byl vybrán nízkozdvíhový ručně vedený vozík (obr. 3.1), jehož základní parametry jsou:

- Hmotnost vozíku: 500 kg
- Maximální zatížení: 2000 kg
- Napětí baterie: 24 V
- Max. rychlost vozíku: $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
- Stoupavost plného vozíku: 8 %
- Stoupavost prázdného vozíku : 16 %



Obr. 3.1 Ručně vedený nízkozdvíhový vozík

Pracovní oblast motoru pojezdu je poměrně rozsáhlá. Motor pojezdu musí generovat dostatečně vysoký moment, aby se plně naložený vozík mohl pohybovat po rampě o maximálním povoleném sklonu, a musí umožnit dosáhnout maximální povolené rychlosti vozíku při pohybu po rovné ploše. Pracovní oblast lze ohraničit

jednotlivými pracovními body, které jsou uvedeny v tabulce 3.1. Motor pracuje se zatěžovatelem S2 – 60 min.

Tabulka 3.1 Pracovní body přímého pohonu nízkozdvížného vozíku

Pracovní bod	Moment [Nm]	otáčky [min^{-1}]
Maximální moment – rozjezd plně naloženého vozíku	450	20
Pohyb plně naloženého vozíku po rampě s max. sklonem	393	35
Pohyb plně naloženého vozíku po rovné ploše	80	91
Pohyb prázdného vozíku po rovné ploše	16	99

Problémem přímého pohonu je i dostatečně účinné chlazení. Motor musí být chlazen vzduchem bez možností použití přídavného ventilátoru. Díky nízkým otáčkám motoru budou největší část celkových ztrát motoru představovat ztráty ve vinutí statoru. Velikost těchto ztrát bude především záležet na provozním zatížení vozíku.

Synchronní motor bude umístěn přímo v pojezdovém kole vozíku. Z tohoto důvodu se jeví jako konstrukčně mnohem jednodušší varianta motoru s vnějším rotorem. Díky této konstrukci motoru, může být pojezdové kolo přímo nalisováno na vnější rotor a odpadnou problémy se zajištěním přenosu momentu z hřídele na pojezdové kolo.

Výhodou motorů s vnějším motorem oproti provedení s vnitřním rotorem je vyšší dosažitelný moment, který motor vytvoří při zachování stejného objemu a proudu motoru. Výhodami SMPM s vnitřním rotorem je jednodušší výroba vinutí i lepší tepelné vlastnosti. U SMPM vzniká podstatná část ztrát ve statoru. Platí to pro pomaluběžné momentové motory, kde jsou dominantní ztráty ve vinutí, i pro motory vysokootáčkové, kde podstatnou část tvoří ztráty v železe statoru. U motorů s vnitřním rotorem jsou ztráty ze statoru přímo odváděny do okolního prostředí. U motorů s vnějším rotorem je odvod ztrát z vnitřního prostoru mnohem horší a je nutné brát větší ohled na správnost tepelného návrhu.

Z prostudovaných pramenů se pro konstrukci motoru s vnějším rotorem jeví nejvhodněji synchronní motory s radiálním tokem a permanentními magnety na rotoru a motory s transversálním tokem. Tyto dva typy motorů budou podrobněji popsány v dalších kapitolách.

4. SMPM s radiálním tokem

Pro přímý pohon nízkozdvížného vozíku byly omezující parametry nastaveny takto:

- Napětí baterie 24 V
- Max. vnější průměr motoru 255 mm
- Maximální proud motoru 250 A
- Maximální teplota rotoru 60 °C
- Vzduchové chlazení

Navrhovaný motor musí vyhovět všem pracovním bodům. Motor musí být dostatečně velký, aby vytvářel požadovaný vysoký moment potřebný pro rozjezd plně naloženého vozíku a pro jeho pohyb po rampě o maximálním sklonu. Rozměry motoru jsou u této aplikace výrazně ovlivněny průměrem pojezdového kola i velikostí vnitřního prostoru vozíku, kde má být motor uložen. Motor nesmí zhoršit poloměr otáčení vozíku.

Velikost motoru je výrazně ovlivněna i typem použitého chlazení a maximální přípustnou teplotou povrchu motoru. V tomto případě je na vnějším rotoru přímo nalisováno pojezdové kolo z materiálu Vulcolan, jehož maximální dovolená provozní teplota se pohybuje kolem 60 °C.

Pro návrh a následnou optimalizaci byly použity programy využívající pro výpočet elektrických strojů jak analytické tak numerické metody.

4.1. Návrh a optimalizace SMPM

Pomocí analytického programu SPEED bylo propočítáno mnoho vhodných i méně vhodných variant SMPM, které se lišily počtem pólů, počtem drážek, rozměry magnetického obvodu i skladbou vinutí. Pomocí tohoto programu byly provedeny i základní optimalizační výpočty týkající se správné volby počtu drážek a počtu pólů motoru [1-4]. Pro tyto výpočty byly určeny předběžné rozměry magnetického obvodu. Optimalizace magnetického obvodu byla provedena pomocí programu FLUX, který pro analýzu magnetického pole využívá metodu konečných prvků. Z úsporných důvodů jsou zde uvedeny pouze některé výsledky optimalizačních výpočtů [15-17].

Volba vhodného počtu pólů

Pro stanovení vhodného počtu pólů pro motor s 36 drážkami byly spočítány 4 různé varianty, které se lišily počtem pólů na rotoru. Byly spočítány varianty s 24, 30, 32 a 34 póly. Všechny motory měly stejné rozměry magnetického obvodu, stejnou hmotnost magnetů i stejný průřez vinutí v drážkách. Motory s různým počtem pólů se liší uložením jednotlivých cívek v drážkách statoru.

U všech motorů byly spočítány parametry ve všech pracovních bodech. V tabulce 4.1 jsou pak porovnány základní parametry všech čtyřech motorů. Na obrázku 4.1 jsou vyneseny celkové vypočítané ztráty všech čtyř motorů ve všech pracovních bodech.

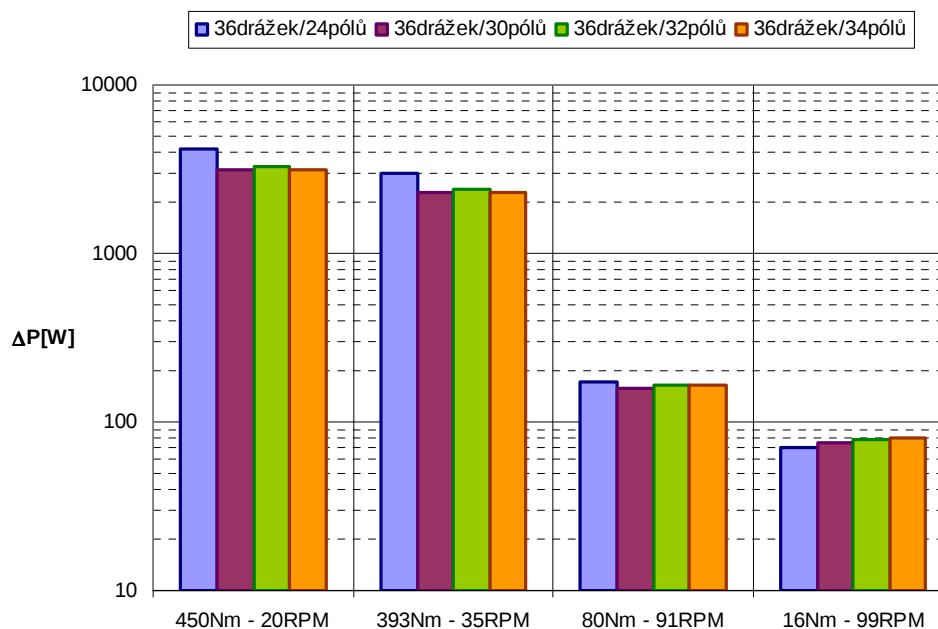
V závislosti na počtu pólů se mění činitel vinutí daného motoru. Nejvyššího činitele 0,966 dosahuje motor s 30 póly, naopak nejnižšího činitele vinutí 0,866 dosahuje motor s 24 póly. Motor s nižším činitelem vinutí bude potřebovat větší proud pro dosažení maximálního momentu, což povede ke zvýšení ztrát ve vinutí motoru. Motory s vyšším počtem pólů budou díky vyšší napájecí frekvenci generovat vyšší ztráty v železe.

Tabulka 4.1 Základní parametry 36 drážkových SMPM s různým počtem pólů

	24 pólů	30 pólů	32 pólů	34 pólů
Vnější průměr rotoru [mm]	255	255	255	255
Délka svazku [mm]	150	150	150	150
Vzduchová mezera [mm]	1	1	1	1
Magnety	Nd - Fe - B	Nd - Fe - B	Nd - Fe - B	Nd - Fe - B
Maximální moment [Nm]	450	450	450	450
Maximální proud [A]	235	220	226	220
Činitel vinutí [-]	0,866	0,966	0,945	0,956
Počet drážek na pól a fázi [-]	0,5	0,4	0,375	0,353
Maximální frekvence [Hz]	19,80	24,75	26,40	28,05
Hmotnost magnetů [kg]	2,6	2,6	2,6	2,6
Hmotnost mědi [kg]	5,5	5,5	5,5	5,5

Z obrázku 4.1 je zřejmé, že motory s 30, 32 a 34 póly vytvářejí téměř shodné ztráty ve všech pracovních bodech. Při vyšším zatížení 32-pólový motor díky nižšímu činiteli vinutí vytváří o něco vyšší ztráty v mědi než 30 a 34-pólové motory. Při vyšších otáčkách, kde většího vlivu dosahují ztráty v železe, vytváří nejvyšší ztráty 34-pólový motor. 24-pólový motor díky nízkému činiteli vinutí vytváří při vyšším

zatížení výrazně vyšší ztráty než zbývající tři motory, a proto je pro tuto aplikaci nejméně vhodný.



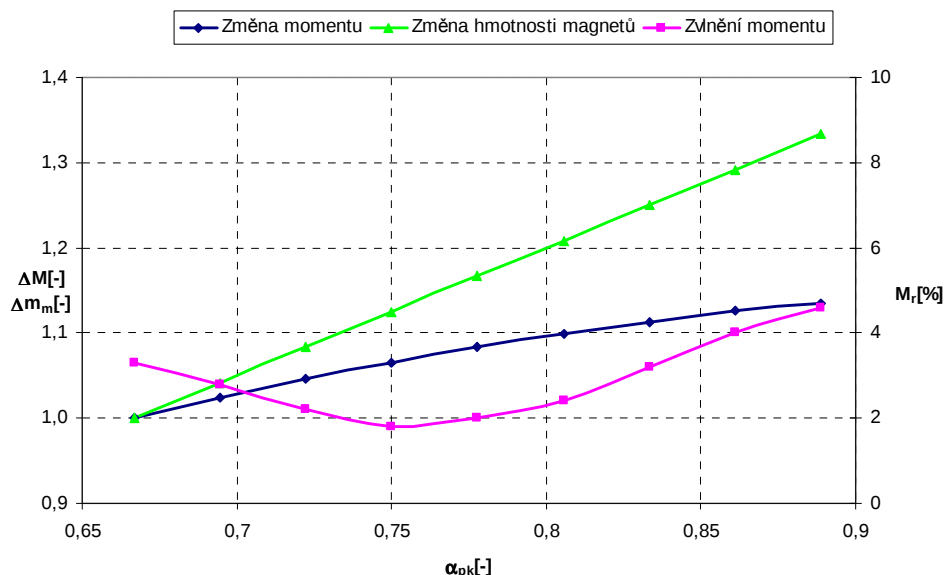
Obr. 4.1 Porovnání ztrát motorů s různým počtem pólů

Na základě optimalizačních výsledků byl jako nejvhodnější zvolen motor s 36 drážkami a 34 póly na rotoru. V programu FLUX 2D byl vytvořen model, pomocí kterého byl optimalizován magnetický obvod tohoto motoru. Cílem této dodatečné optimalizace bylo navrhnout motor tak, aby s danými rozměrovými, napěťovými a proudovými omezeními splnil všechny požadavky, které tato aplikace vyžaduje, a aby spotřeba aktivních materiálů zejména permanentních magnetů (cena motoru) byla co nejnižší při zachování přijatelné účinnosti motoru.

Vliv pólového krytí na velikost momentu motoru

U 34-pólového motoru byla zjištěna závislost pólového krytí na velikosti a zvlnění momentu při konstantním proudu 200 A (obr. 4.2). Se zvětšujícím se pólovým krytím roste magnetický tok i moment motoru. Tento nárůst momentu je nižší než nárůst hmotnosti permanentních magnetů. Při změně pólového krytí z hodnoty 0,67 na 0,83 se hmotnost (cena) permanentních magnetů zvýší o 25 %, přičemž moment motoru naroste pouze o 11 %. Hodnotu pólového krytí je nutné volit obezřetně a vždy s ohledem na požadavky dané aplikace. Malé zvlnění momentu je důležité zejména pro servomotory

s přesným polohovým řízením, kde by velké zvlnění momentu mohlo snížit přesnost polohového řízení. U tohoto motoru dosahuje zvlnění momentu nejnižší hodnoty pro pólové krytí $\alpha_p = 0,75$. V oblasti minimálního zvlnění momentu bylo zvoleno pólové krytí i u navrhovaného motoru.



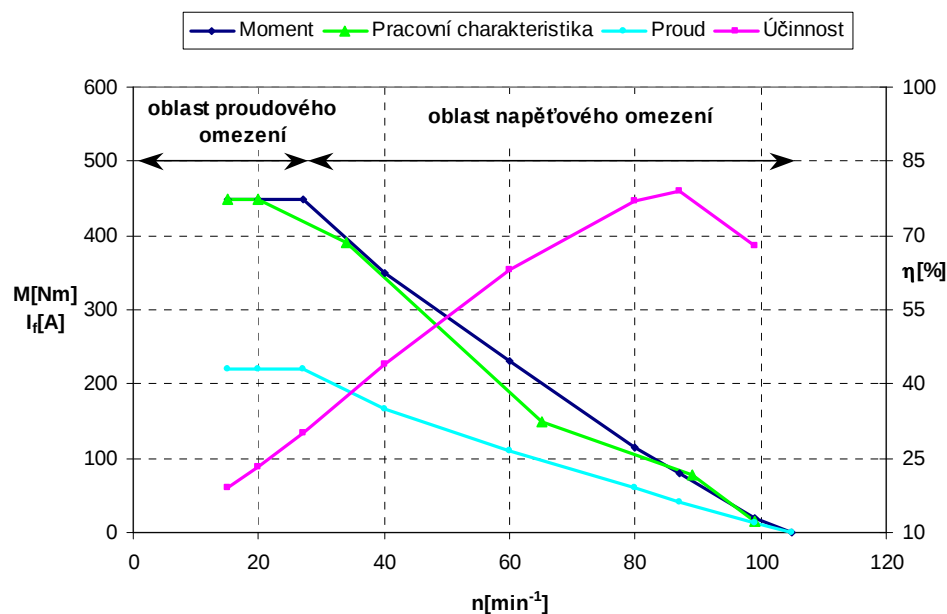
Obr. 4.2 Závislost momentu a zvlnění momentu na pólovém krytí

Na základě výsledků optimalizace byly určeny konečné rozměry magnetického obvodu a parametry vinutí 34-pólového SMPM. Pro navržený motor byla spočítána křivka vymezující pracovní oblast, ve které motor může pracovat s danými proudovými a napěťovými omezeními. Motor je napájen sinusovými proudy a v celé pracovní oblasti je řízen v příčné ose. Při tomto řízení je proud v příčné ose (q-ose) kolmý k fázoru magnetického toku vytvořeného permanentními magnety.

Pracovní oblast, ve které může motor pracovat je vynesena na obrázku 4.3. Dané proudové a napěťové omezení mají za následek, že navržený motor dosahuje některých pracovních bodů s minimální rezervou. V pracovním bodě odpovídajícímu pohybu plně naloženého vozíku po rovné ploše ($80 \text{ Nm} - 91 \text{ min}^{-1}$) jsou vypočtené parametry nepatrně horší než požadované. V tomto případě by plně naložený vozík nedosáhl požadované rychlosti, ale jel by asi o 4 % nižší rychlostí.

Dosažení tohoto pracovního bodu by umožnilo snížení počtu závitů vinutí, které by ovšem mělo negativní vliv na dosažení maximálního požadovaného momentu motoru. Další možností, jak dosáhnout požadovaného pracovního bodu, je řízení motoru

v oblasti zeslabování magnetického pole. V tomto případě fázový proud motoru není tvořen pouze příčnou složkou (q-složkou), ale i přiměřeně velkou podélnou složkou (d-složkou), která má za následek mírné odbuzení motoru. Při tomto způsobu řízení pak motor může pracovat ve větším rozsahu otáček. Nevýhodou tohoto řízení je ovšem mnohem složitější řídicí algoritmus, který musí zajistit správné nastavení d i q-složky proudu v celé pracovní oblasti. Odbuzování magnetického pole pomocí d-složky proudu má za následek zvýšené ztráty ve vinutí motoru.



Obr. 4.3 Vypočtená pracovní oblast 34-pólového SMPM

4.2. Prototyp 34-pólového SMPM

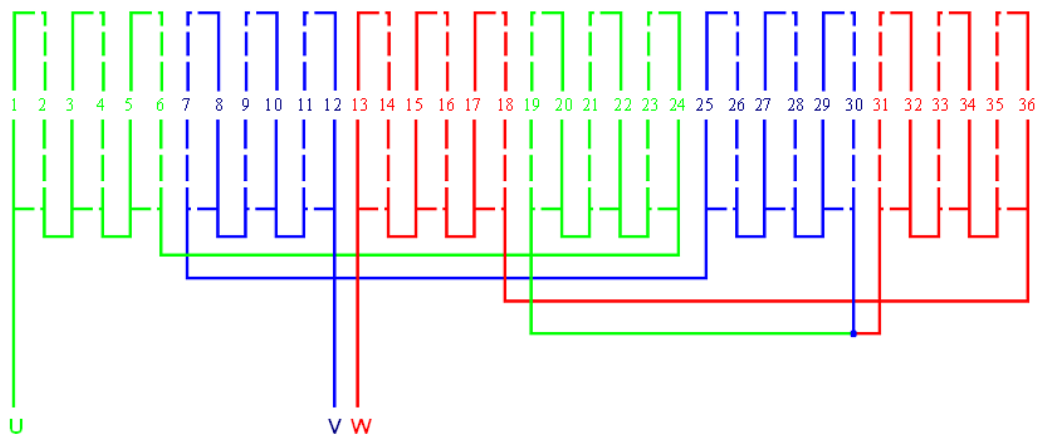
Podle návrhu byl vyroben prototyp 34-pólového motoru (obr. 4.4), jehož schéma vinutí je na obrázku 4.5. Základní parametry motoru jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2 Základní parametry prototypu 34-pólového SMPM

Počet drážek	36	Jmenovité sdružené napětí	14 V
Počet pólů	34	Maximální moment	450 Nm
Vnější průměr motoru	255 mm	Maximální otáčky	99 min ⁻¹
Délka svazku	150 mm	Maximální proud	220 A
Vzduchová mezera	1 mm	Magnety	Nd-Fe-B
Počet vrstev zlomkového vinutí	1	Jakost plechů	M800-50A



Obr. 4.4 Prototyp 34-pólového motoru

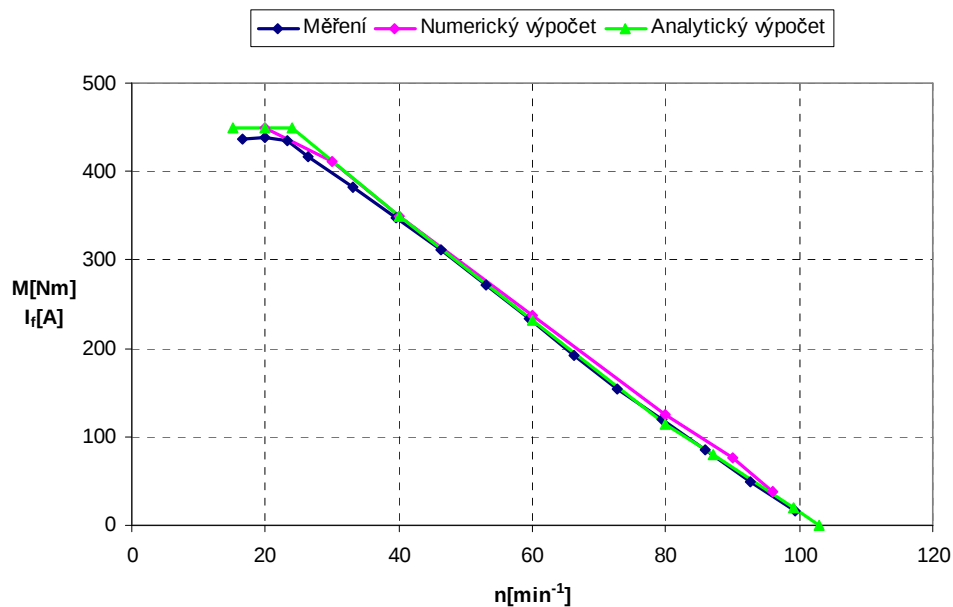


Obr. 4.5 Schéma zapojení vinutí 34-pólového motoru

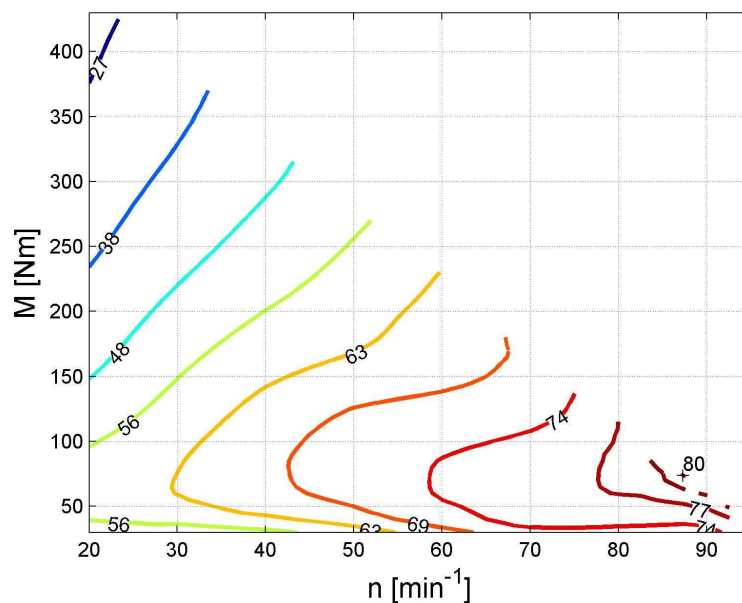
Motor byl napájen třífázovým čtyř-kvadrantovým měničem s pulsní šířkovou modulací (PWM). Maximální proud měniče je omezen na 220 A. Motor byl v celém rozsahu otáček řízen v q-ose.

Motor byl podrobně testován v laboratoři. Některé naměřené charakteristiky jsou uvedeny v následujících grafech. Na obrázku 4.6 je porovnání křivek vymezující pracovní oblast 34-pólového SMPM. Naměřená charakteristika odpovídá vypočteným charakteristikám. Menší rozdíly jsou pouze v oblasti kolem 90 otáček a v oblasti maximálního momentu. Maximální naměřený moment byl 438 Nm při proudu 220 A.

Na obrázku 4.7 je vynesena mapa účinnosti motoru v celé pracovní oblasti. Motor dosahuje nejvyšší účinnosti v oblasti maximálních otáček. Poměrně nízká účinnost motoru je způsobena požadavkem o dosažení vysokého momentu při nízkých otáčkách, tzn. při malém výkonu motoru.



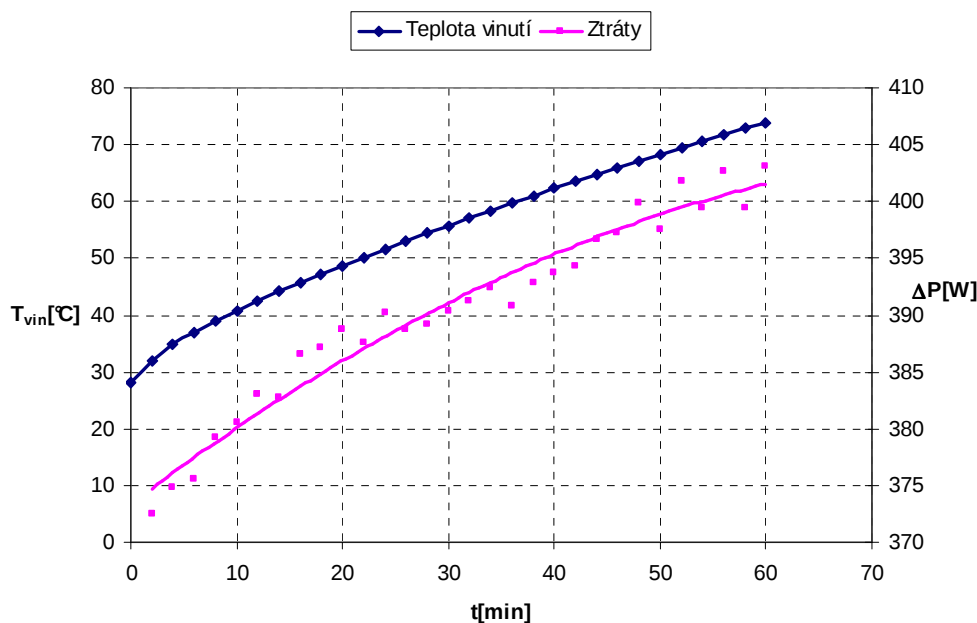
Obr. 4.6 Porovnání křivek vymezujících pracovní oblast 34-pólového SMPM



Obr. 4.7 Změřená mapa účinnosti 34-pólového SMPM

Pro jmenovitý bod ($150 \text{ Nm} - 65 \text{ min}^{-1}$) byla změřena oteplovací zkouška (obr. 4.8). Teplotní čidlo bylo umístěno ve vinutí motoru, kde vzniká největší část celkových ztrát a tudíž zde bude dosažena nejvyšší teplota. Nejrizikovějším místem je ale povrch rotoru, na němž je nalisována pneumatika. Maximální dovolená teplota povrchu rotoru, při které ještě nedojde k poškození materiálu pneumatiky,

je 60 °C. Po 60-minutách dosahuje teplota vinutí asi 74 °C, povrch rotoru dosahuje pouze 53 °C.



Obr. 4.8 Oteplovací zkouška 34-pólového SMPM

4.3. Zhodnocení návrhu 34-pólového SMPM

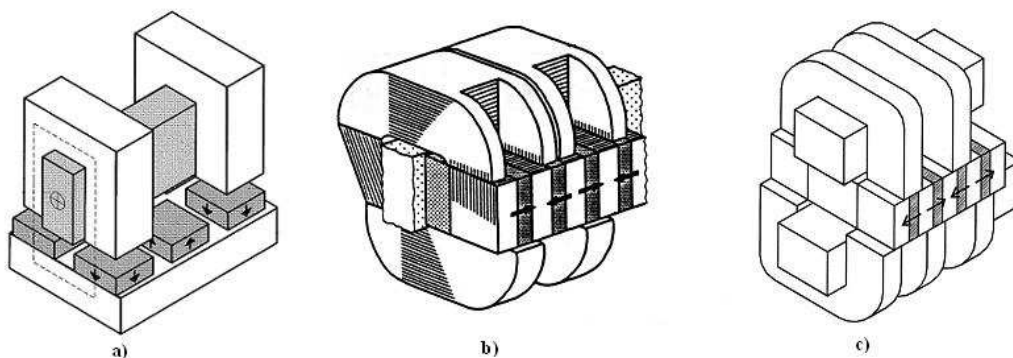
Na základě podrobných optimalizačních výpočtů byl pro přímý pohon nízkozdvížného vozíku navržen 34-pólový SMPM s jednovrstvým zlomkovým vinutím. Podle návrhu byl motor vyroben a následně testován v laboratoři. Výsledky měření potvrdily správnost návrhu, a proto 34-pólový TFM se jeví jako vhodná alternativa pro přímý pohon nízkozdvížného vozíku.

Přínosem této kapitoly dizertační práce je zejména podrobné porovnání jednovrstvých a dvouvrstvých zlomkových vinutí. Dvouvrstvá zlomková vinutí předčí jednovrstvá vinutí v mnoha ohledech, navíc umožní dosáhnout i vyššího momentu než motory s jednovrstvým zlomkovým vinutím při stejném proudu. Nevýhodou je náročnější výroba i zapojování vinutí, které se skládá z většího počtu cívek.

Přínosem je i optimalizace počtu pólů SMPM při konstantním počtu drážek, která porovnává vlastnosti těchto motorů z hlediska velikosti dosažitelného momentu, účinnosti v různých pracovních bodech, zvlnění momentu atd.

5. Motory s transversálním tokem

První zmínky o motorech s transversálním tokem se nejdříve objevují v článcích profesora Herberta Weha v 80. letech minulého století [5]. Od této doby se objevilo mnoho různých koncepcí TFM, které se lišily různými tvary statoru i rotoru, způsobem uložení magnetů i různými materiály magnetického obvodu [6-13]. Společným rysem všech těchto koncepcí je velmi komplikovaná konstrukce magnetického obvodu, zejména statoru (obr. 5.1).



Obr. 5.1 Různá provedení motorů s transversálním tokem

5.1. TFM s magnety na povrchu rotoru

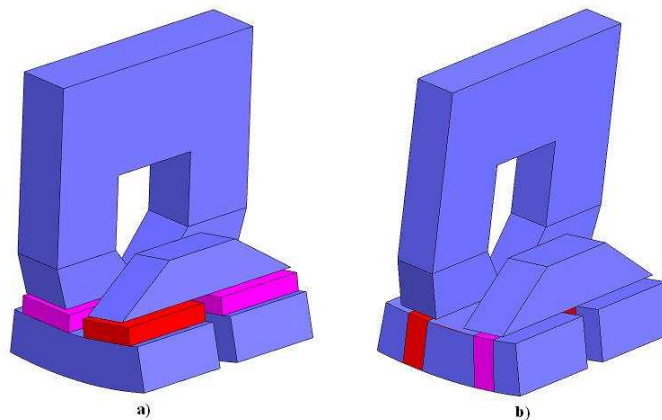
Pro přímý pohon byl navržen i motor s transversálním tokem. Pro navržený motor platily stejné pracovní body (tabulka 3.1) i omezující parametry jako pro synchronní motor s PM. Maximální délka magnetického obvodu TFM byla stanovena tak, aby odpovídala délce SMPM i s čely vinutí. Tato délka byla stanovena na 170mm. Dalším omezujícím parametrem byla vyrobiteľnost magnetického obvodu z izolovaných křemíkových plechů.

TFM byl navržen ve dvou provedeních s magnety na povrchu rotoru a s koncentrací toku (obr. 5.2) [18, 19]. Lepší elektromagnetické vlastnosti vykazuje TFM s magnety na povrchu, a proto veškeré údaje uvedené v těchto tezích se budou týkat pouze tohoto provedení.

Magnetický obvod statoru je tvořen ze dvou částí – U-jader a I-jader. Obě části jsou z důvodů omezení ztrát v železe vyrobeny z izolovaných plechů. Tvary i rozměry U a I-jader jsou optimalizovány tak, aby magnetický obvod měl co největší průřez, byl

zachován dostatečný prostor pro uložení vinutí a byl omezen rozptylový tok mezi jednotlivými částmi magnetického obvodu.

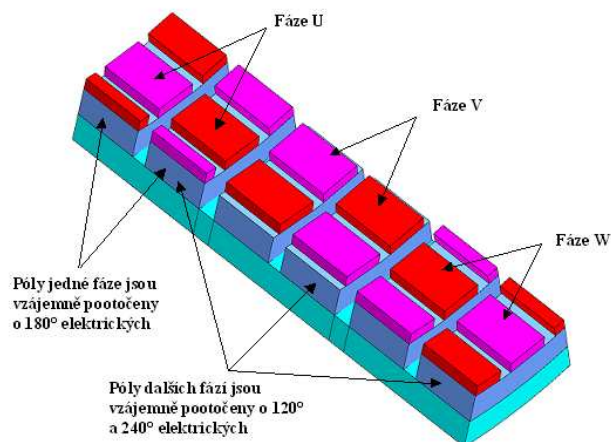
Rotor je tvořen šesti magnetickými mezikružemi – jhy, na jejichž vnitřním povrchu jsou nalepeny permanentní magnety Nd-Fe-B (obr. 5.3). Jednotlivá jha jsou upevněna ve válcové kostře, která je vyrobena z nemagnetického materiálu.



Obr. 5.2 Motor s transversálním tokem

a) s magnety na povrchu rotoru

b) s koncentrací toku



Obr. 5.3 Rotor TFM s magnety na rotoru

Aby v motoru vzniklo točivé magnetické pole je nutné zajistit správný fázový posun mezi jednotlivými částmi magnetického obvodu. Výrobně jednodušším principem je mezi sebou fázově posunout jednotlivá mezikružít rotoru, jak je naznačeno na obrázku 5.3 a statorové části magnetického obvodu ponechat v jedné rovině. Vinutí každé fáze je tvořeno jednou samostatnou cívkou, která je umístěna v „drážkách“ U-jader. Fázové cívky jsou spojeny do hvězdy.

5.2. Návrh a optimalizace TFM s magnety na povrchu rotoru

Pro určení prvních parametrů TFM i základních rozměrů magnetického obvodu byl vytvořen jednoduchý analytický program, který pro výpočet používal obecné vztahy pro výpočet magnetického obvodu.

Po stanovení základních rozměrů byl vytvořen v programu FLUX 3D 1-fázový model, pomocí něhož byly ověřeny první výpočty i proběhla optimalizace celého motoru. Pomocí 3-fázového modelu byly stanoveny konečné elektromagnetické parametry motoru. Požadavky na optimalizaci byly obdobné jako u SMPM, pouze byl kladen větší důraz na dosažení maximálního momentu.

U TFM je moment jedné fáze motoru závislý na počtu pólů a lze vyjádřit jako

$$m_{1f}(t) = k_m p \frac{d\Phi(i, \alpha)}{dt} i(t) \quad (5.1)$$

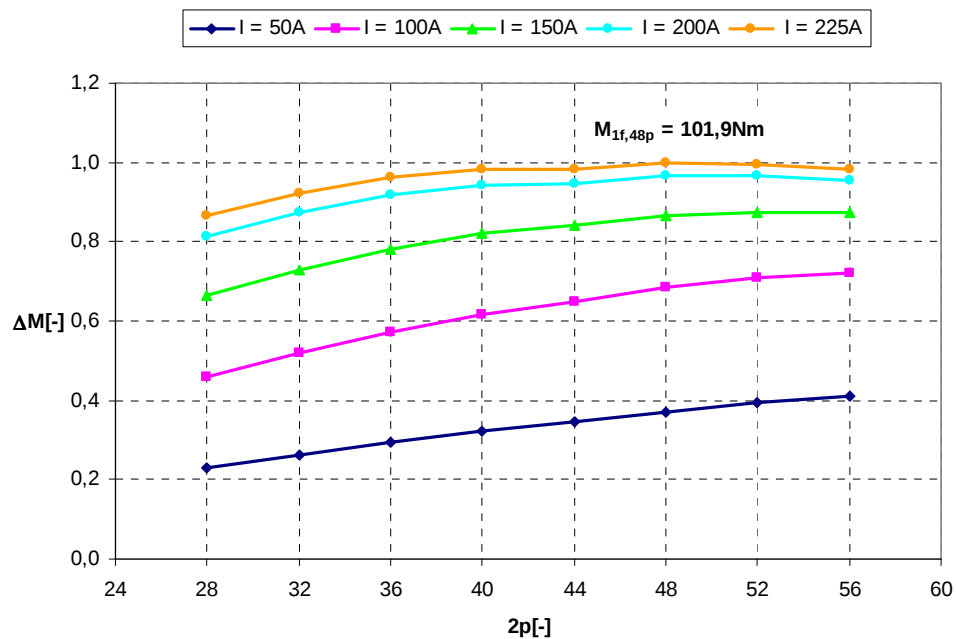
Moment celého motoru je dán součtem dílčích momentů jednotlivých fází.

$$m(t) = m_{1f}(t) + m_{2f}(t) + m_{3f}(t) \quad (5.2)$$

Moment motoru je tedy závislý nejen na rozměrech motoru, rozměrech magnetů a počtu závitů vinutí, ale i na počtu pólů, čímž se TFM výrazně odlišuje od běžných SMPM s radiálním tokem.

Pro zjištění závislosti momentu motoru na počtu pólů, byly spočítány pomocí 1-fázového modelu vlastnosti motorů s počtem pólů v rozmezí od 28 do 56. U těchto modelů byly zachovány stejné vnější rozměry, výška vzduchové mezery i PM, stejné pólové krytí i stejný počet závitů. Motory se lišily pouze počtem pólů a na to navazující šířkou magnetů a šířkou U a I-jader. Šířka magnetů, U i I-jader byla nastavena vždy tak, aby u všech motorů byla zachována stejná hmotnost PM i celkový průřez magnetického obvodu. Závislost momentu na počtu pólů je vynesena na obrázku 5.4.

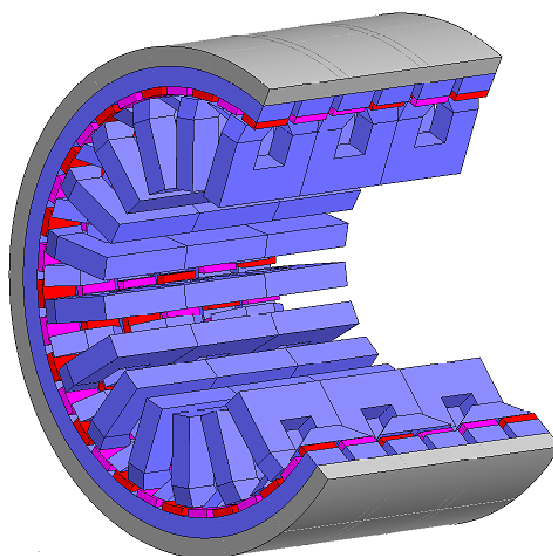
Jednotlivé hodnoty jsou vztaženy k hodnotě maximálního momentu $M_{1f,48p} = 101,9 \text{ Nm}$ (48-pólový motor, proud 225 A). Maximální moment se při daném proudu u motorů s vyšším počtem pólů už téměř nemění, a proto u TFM s magnety na povrchu není vhodné použít motory s větším počtem pólů než je 40. Tomuto počtu pólů odpovídá pólová rozteč $\tau_p = 16,1 \text{ mm}$.



Obr. 5.4 Závislost momentu na počtu pólů pro různé hodnoty proudu

Pomocí programu Flux byl optimalizován i magnetický obvod. Magnetický obvod byl navržen tak, aby motor dodával maximální moment při zachování dostatečného průřezu pro vinutí stroje, přijatelného sycení magnetického obvodu i nízké spotřebě PM.

Na základě optimalizačních výsledků byl navržen 36-pólový TFM s magnety na povrchu (obr. 5.5).



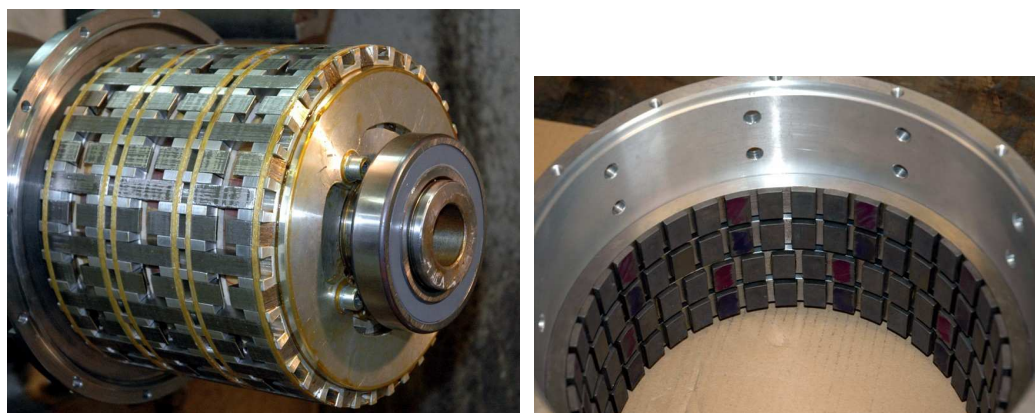
Obr. 5.5 Model TFM s magnety na povrchu

5.3. Prototyp 36-pólového TFM

Podle návrhu byl vyroben prototyp 36-pólového TFM (obr. 5.6), jehož základní parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Základní parametry TFM s magnety na povrchu rotoru

Počet pólů	36	Jmenovité sdružené napětí	14 V
Počet U-jader	18	Maximální moment	308 Nm
Počet I-jader	3 x 18	Maximální otáčky	120 min ⁻¹
Vnější průměr motoru	255 mm	Maximální proud	220 A
Délka svazku	170 mm	Magnety	Nd-Fe-B
Vzduchová mezera	1 mm	Jakost plechů	M800-50A



Obr. 5.6 Prototyp 36-pólového TFM s magnety na povrchu rotoru

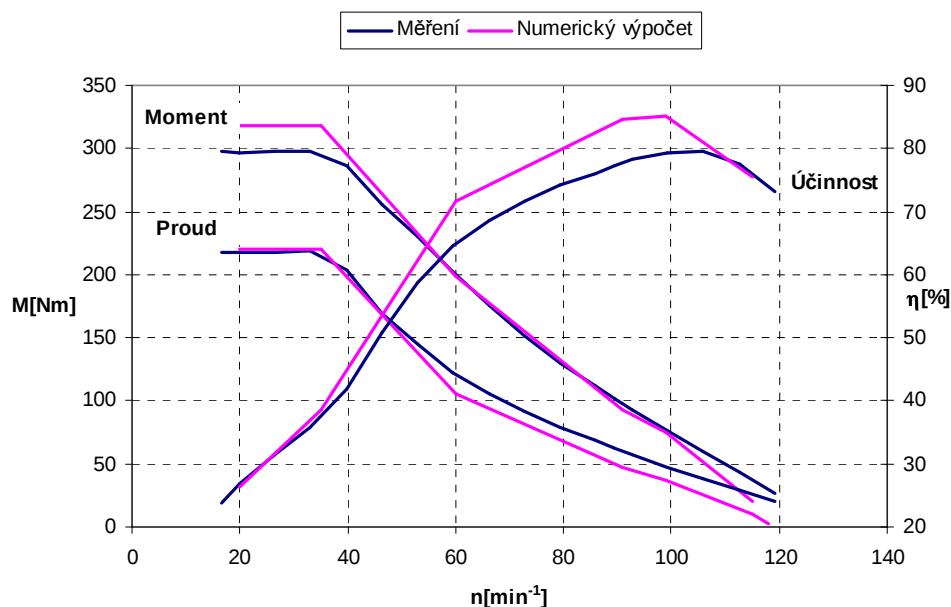
Vyrobený TFM byl stejně jako SMPM testován v laboratoři. TFM byl podrobně proměřen ve stavu za studena. Vlastnosti TFM za tepla a oteplovací zkoušky bohužel nemohly být změřeny. Důvodem bylo poškození motoru během oteplovací zkoušky. Rozdílné tepelné roztažnosti hliníku a železa způsobily uvolnění některého I-jádra, které znemožnilo další měření.

TFM byl napájen třífázovým čtyř-kvadrantovým měničem s pulsní šířkovou modulací. Motor byl v celém rozsahu otáček řízen v q-ose. Maximální proud měniče byl opět omezen na 220 A. Porovnání některých naměřených a vypočtených charakteristik je vyneseno v několika následujících grafech.

Rozdíly mezi změřenými a vypočtenými hodnotami jsou větší než tomu bylo u SMPM. Ve většině případů jsou vypočtené výsledky lepší než změřené. Důvodů pro tyto rozdíly je několik. Některé jsou stejné jako u SMPM, tzn. nutností měřit parametry

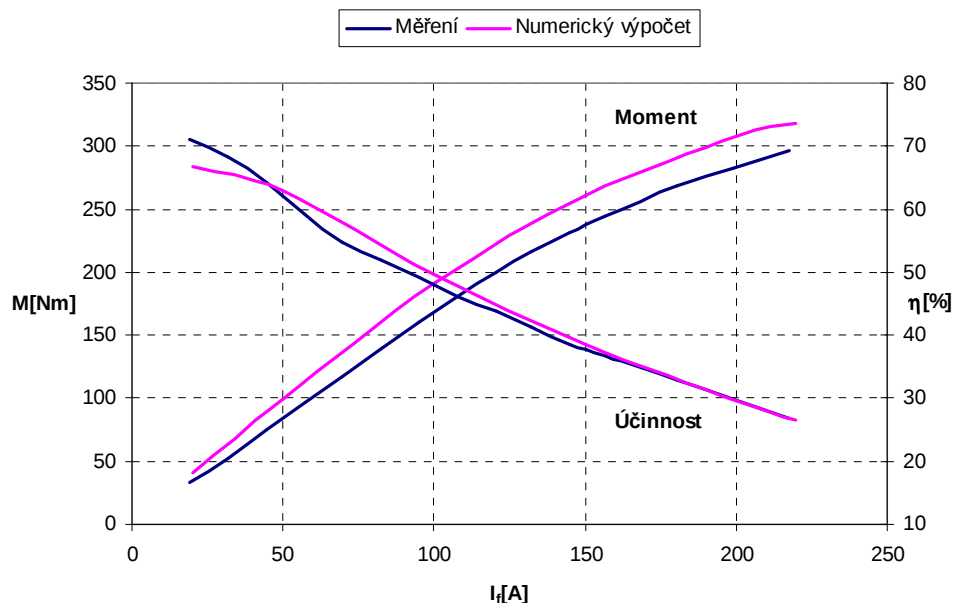
TFM přes převodovku, tolerance v udávaných magnetických vlastnostech materiálů. Dalším vlivem, proč výpočty jsou lepší než změřené hodnoty, je i idealizace magnetického obvodu při výpočtu. Při výpočtu nebylo uvažováno s drážkou U a I-jádra pro umístění bandáže, která v určité části pod magnety zvyšuje vzduchovou mezeru a tudíž snižuje i dosažitelné parametry motoru. Díky rozdělení U-jader na dvě části z důvodu jednoduššího způsobu výroby TFM vznikla mezi těmito částmi i malá parazitní vzduchová mezera, která byla při výpočtu také zanedbána.

Na obrázku 5.7 je porovnání křivek vymezujících pracovní oblast TFM při daných proudových a napěťových omezeních. Rozdíly mezi křivkami nejsou velké, největší rozdíl je v oblasti nízkých otáček, kdy vypočtené hodnoty momentu jsou asi o 7% procent vyšší než hodnoty změřené.



Obr. 5.7 Porovnání křivek vymezujících pracovní oblast TFM

Na obrázku 5.8 je vyneseno porovnání zatěžovacích charakteristiky při $n = 20 \text{ min}^{-1}$. Vypočtené hodnoty jsou o něco vyšší než naměřené hodnoty. U této charakteristiky se nejvíce projevily úpravy do magnetického obvodu, které byly nutné pro výrobu motoru, ale nebyly uvažovány při výpočtu TFM.



Obr. 5.8 Porovnání zatěžovacích charakteristik TFM při $n = 20 \text{ min}^{-1}$

5.4. Zhodnocení návrhů TFM

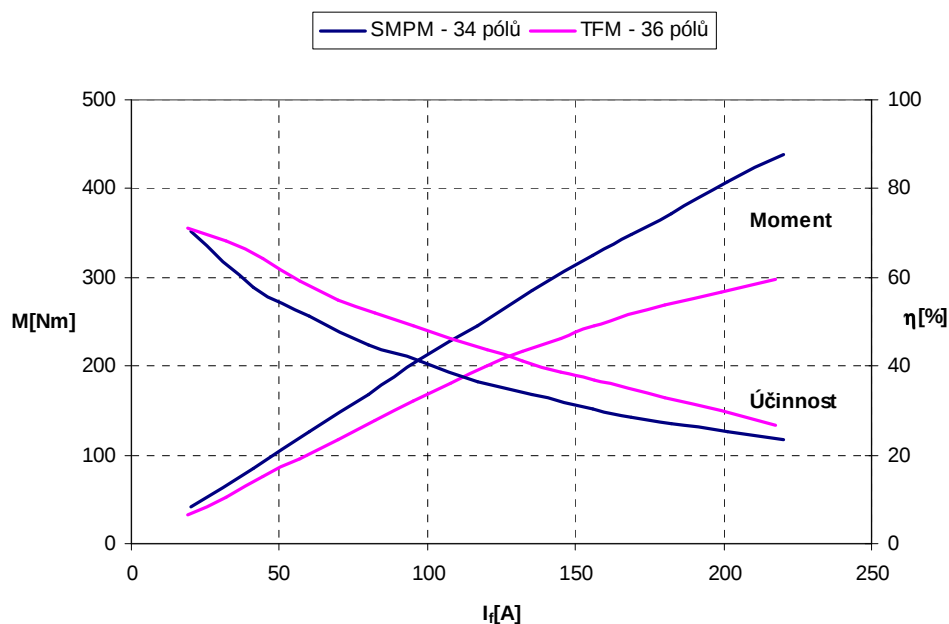
V této kapitole byly popsány motory s transversálním tokem, jejichž magnetické obvody statoru lze vyrobit z izolovaných plechů. Byly porovnány dvě varianty s magnety na povrchu rotoru a s koncentrací toku. Díky lepším elektromagnetickým vlastnostem i jednodušší výrobě byla větší pozornost věnována variantě s magnety na povrchu rotoru. Na základě výsledků podrobné a časově velmi náročné optimalizace byl navržen 36-pólový TFM, který byl následně vyroben a testován v laboratoři. I u tohoto provedení TFM se projevila velká náročnost výroby TFM. Snížit náročnost výroby by bylo možné při použití magnetických materiálů z amorfních slitin, které by umožnilo výrazně zjednodušit magnetický obvod statoru a mohlo by vést k většímu rozšíření TFM. Tímto směrem by bylo vhodné zaměřit další výzkum těchto motorů.

Vyzdvihnout největší přínos této kapitoly není jednoduché. TFM jsou poměrně novým typem stroje, ale v některých zahraničních pracích lze najít mnoho užitečných informací o vlastnostech i o návrhu těchto strojů. Přesto se při vlastním návrhu nelze obejít bez numerických výpočtů. Jako velmi přínosné lze vyhodnotit zejména optimalizaci počtu pólů a počtu závitů motoru i závislosti indukčnosti a účinníku na počtu pólů motoru.

6. Porovnání SMPM a TFM s magnety na povrchu rotoru

Z hlediska použitelnosti by porovnání synchronního motoru s radiálním tokem s motorem s transversálním tokem bylo velmi jednoduché. Motor s transversálním tokem při daných objemových, napěťových a proudových omezeních nevytvoří požadovaný moment a neznámá pro tuto aplikaci přímého pohonu žádný technický pokrok. Při porovnání některých vlastností 34-pólového SMPM a 36-pólového TFM lze zjistit mnoho zajímavých informací. Při porovnání výsledků měření je nutné brát v úvahu určitou rozdílnost podmínek měření, kdy SMPM byl měřen za tepla a TFM jen za studena.

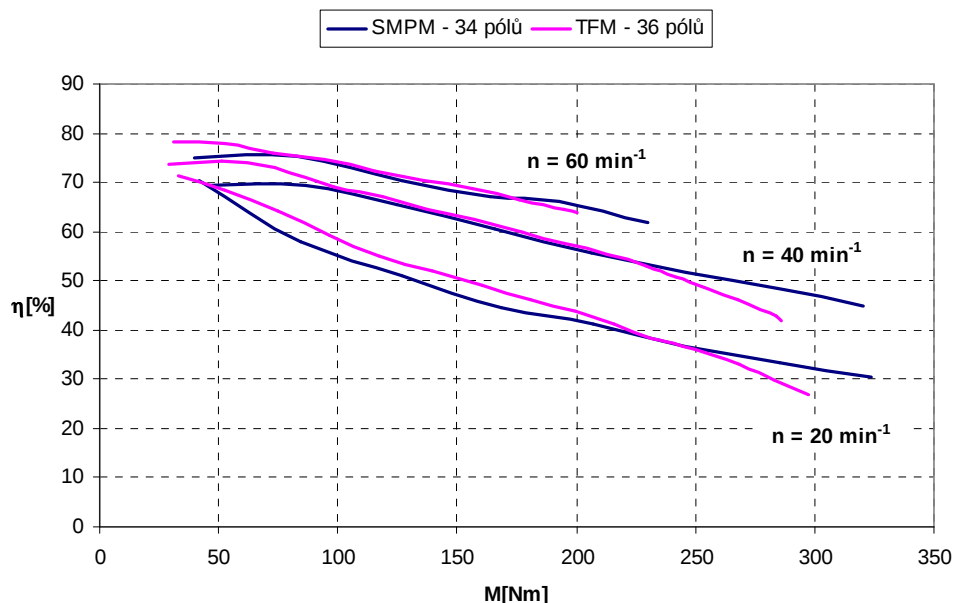
Při porovnání naměřených zatěžovacích charakteristik obou motorů (obr. 6.1) je zřejmé, že moment motoru u SMPM roste téměř lineárně v celém rozsahu proudu, naproti tomu u TFM je při vyšším proudovém zatížení patrné omezení momentu v důsledku nasycení magnetického obvodu i zvyšujícího se rozptylového toku.



Obr. 6.1 Porovnání zatěžovacích charakteristik SMPM a TFM při $n = 20 \text{ min}^{-1}$

Nižší odpor vinutí TFM má za následek vyšší účinnost při stejném proudu i přesto, že TFM dosahuje nižšího výkonu než SMPM. Výstižnější je porovnání účinnosti motoru v závislosti na jeho momentu pro různé otáčky, které je zobrazeno na

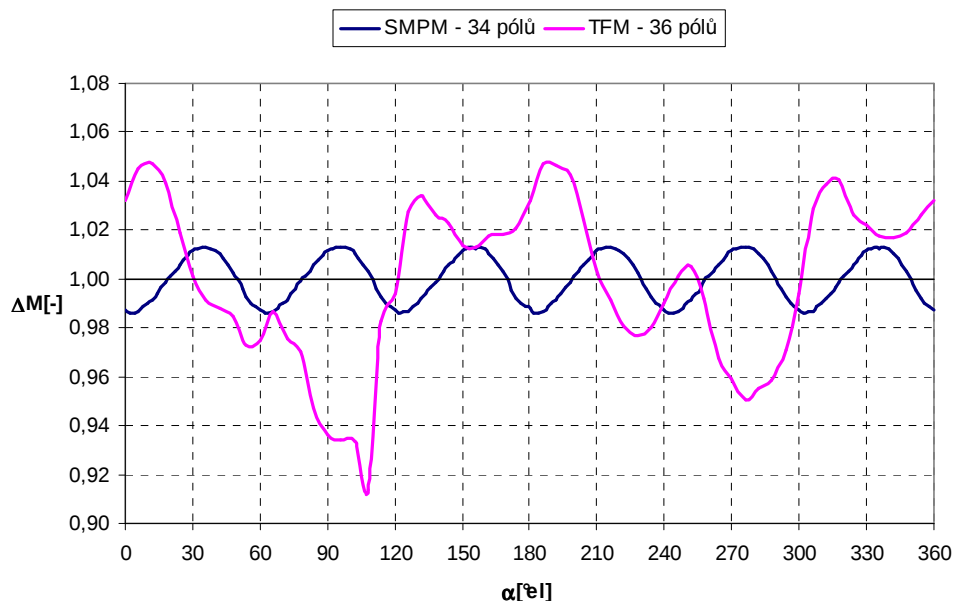
obrázku 6.2. Ze závislosti je zřejmé, že účinnost TFM a SMPM se výrazně neliší. TFM dosahuje vyšší účinnosti v oblasti nízkých momentů, kde nedochází k velkému nasycení magnetického obvodu a kde převládá vliv nižšího odporu vinutí TFM. V oblasti vysokých momentů, dosahuje vyšší účinnosti SMPM, v této oblasti TFM potřebuje mnohem větší proud pro vytvoření požadovaného momentu než SMPM.



Obr. 6.2 Porovnání účinnosti TFM a SMPM v závislosti na momentu

Nespornou výhodou SMPM oproti TFM je výrazně menší zvlnění momentu. Průběh momentu TFM a SMPM při proudu 200 A je na obrázku 6.3. Hodnoty jsou vztaženy ke střední hodnotě jednotlivých průběhů. Zvlnění momentu u SMPM dosahuje asi 1,4 % střední hodnoty momentu. U TFM dosahuje zvlnění více než 5 %. Optimalizací rozměrů U a I-jader by šlo zvlnění momentu částečně snížit, ale díky velkým rozdílům v magnetické vodivosti v závislosti na natočení rotoru se hodnotám SMPM přiblížit nelze. Díky velkému zvlnění momentu nejsou TFM vhodné pro aplikace, ve kterých se klade velký důraz na přesné polohové řízení.

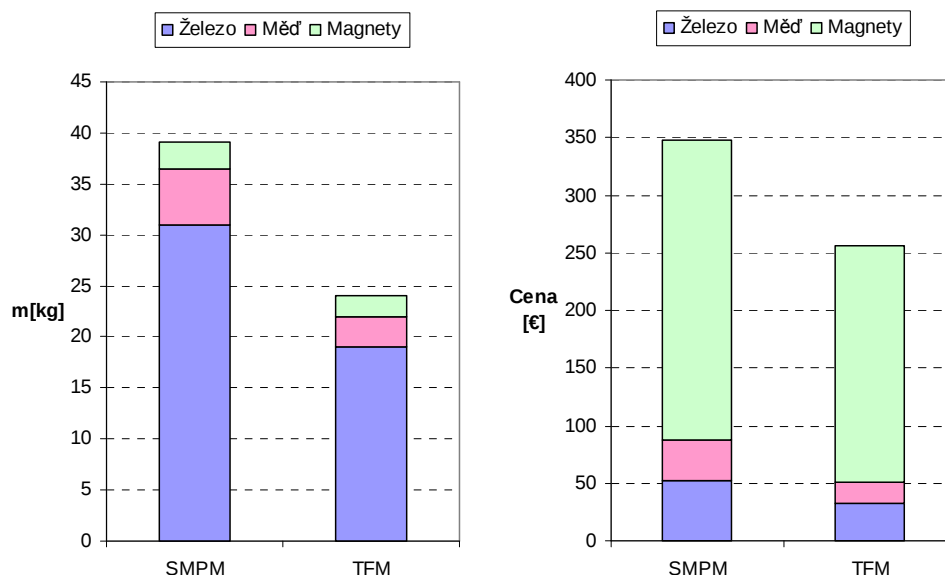
Výhodou SMPM je i jednodušší a levnější výroba. Stator SMPM je složen z plechů, v jehož drážkách je navinuto 3-fázové vinutí. Rotor tvoří jedno válcové jho, na jehož vnitřním povrchu jsou nalepeny PM. Největší problémy při výrobě vznikají při navíjení zlomkového vinutí, pro které se nedá použít standardní automatické vtahování cívek rozloženého vinutí.



Obr. 6.3 Průběh momentu SMPM a TFM při proudu 200A

Výroba TFM je mnohem komplikovanější. Magnetický obvod statoru se skládá z velkého množství částí, které musí být správně uloženy v nosiči a následně pevně spojeny v jeden kompaktní celek. Rotor je tvořen 6-ti nezávislými magnetickými jhy s magnety, která jsou upevněna v kostře z nemagnetického materiálu. Náročnější výroba TFM by mohla být částečně kompenzována nižšími náklady na aktivní materiál. U navrženého TFM lze oproti SMPM ušetřit skoro 40 % železa, 45 % mědi a asi 20 % magnetů. Porovnání hmotnosti a cenových nákladů na aktivní materiály je uvedeno na obrázku 6.4. Při výpočtu cenových nákladů jsou uvažovány ceny 1,7 €/kg železa, 6,3 €/kg mědi a 100 €/kg permanentních magnetů.

Cenová úspora u TFM by ve skutečnosti byla nižší. Ve srovnání je počítáno s jednotnou kilovou cenou železa, která odpovídá průměrné ceně standardních statorových svazků. U TFM díky velkému množství částí by cena za 1 kg železa byla vyšší. Do celkové ceny TFM by se výrazně promítla i cena nosiče.



Obr. 6.4 Porovnání hmotnosti a cenových nákladů na aktivní materiály

Zajímavé výsledky lze zjistit i při porovnání maximálního momentu motoru vztaženému k objemu motoru a hmotnosti aktivních materiálů. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Při vztažení maximální hodnoty momentu na objem motoru dosahuje lepších parametrů SMPM, který vytvoří větší moment se stejným proudovým omezením. Pokud se maximální hodnota momentu vztáhne k hmotnosti aktivních materiálů, lepších výsledků už dosahuje motor s transversálním tokem.

Tabulka 6.1 Porovnání hustoty momentu SMPM a TFM

	SMPM – 34 pólů	TFM – 36 pólů
Průměr motoru [mm]	255	255
Délka statoru [mm]	cca 170 i s čely vinutí	170
Objem motoru [dm ³]	8,68	8,68
Maximální moment (naměřený) [Nm]	438	297
Maximální moment / Objem motoru [Nm·dm ⁻³]	50,5	34,2
Hmotnost aktivních materiálů [kg]	39,1	24,1
Maximální moment / hmotnost akt. materiálů [Nm·kg ⁻¹]	11,2	12,3

7. Závěr

Hlavní cíl dizertační práce navrhnout přímý pohon pojezdu pro aplikaci v oblasti manipulační techniky byl splněn v plném rozsahu. V rámci této dizertační práce byly podrobně analyzovány nové varianty motorů, které lze použít pro přímý pohon nízkozdvížného bateriového vozíku. Podrobněji se zpráva zabývá synchronními motory s PM se zlomkovým vinutím a motory s transversálním tokem. Obě varianty motorů byly podrobně zkoumány a na základě výsledků optimalizace byly navrženy a vyrobeny dva motory pro ověření vypočtených parametrů.

Navržený 34-pólový SMPM s vnějším rotorem splňuje většinu požadavků kladených na přímý pohon, dosahuje vysoké hustoty momentu vztažené na objem motoru, a proto je vhodnou alternativou, která by mohla nahradit současné řešení pohonů pojezdu skládající se z asynchronního motoru a mechanické převodovky. Největším problémem u tohoto typu motoru je efektivní navíjení zlomkového vinutí.

U 36-pólového TFM s magnety na povrchu rotoru se i přes důkladnou a časově velmi náročnou optimalizaci nepodařilo dosáhnout požadovaného maximálního momentu. TFM se navíc vyznačují malou momentovou přetížitelností i komplikovanou výrobou magnetického obvodu statoru. Výhodou TFM oproti SMPM je úspora aktivních materiálů, která může dosahovat asi 40 % u mědi a železa a až 20 % u PM při zachování stejného objemu motoru.

Tato dizertační práce vznikla s podporou grantového projektu Ministerstva průmyslu a obchodu FT – TA3/120.

Literatura

- [1] Libert F., Soulard J. *Investigation on pole-slot combinations for permanent-magnet machines with concentrated windings*. ICEM 2004, Krakov, Polsko.
- [2] Magnussen F., Sadarangani C. *Winding factors and joule losses of permanent magnet machines with concentrated winding*. in Proc. IEEE IEMDC'03, vol. 1, Madison, WI, Jun. 2003, pp. 333–339.
- [3] Salminen P. *Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications*. Ph.D. Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2004, ISBN 951-764-982-7
- [4] Salminen P., Niemelä M., Pyrhönen J. *Performance analysis of fractional slot wound PM-motors for low speed applications*. In proceeding Industry applications Conference, p. 1032-1037, Seattle, USA 2004.
- [5] Weh H., May H. *Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configuration*. In proceeding Int. Conf. Electrical machines, Munich, Germany, p. 1107-1111, 1986.
- [6] Blissenbach R. *Entwicklung von permanenterregten Transversalflussmaschinen hoher Drehmoment dichte für Traktionsantriebe. Berichte aus der Elektrotechnik*. Aachen 2002. ISBN 3-8322-0996-4
- [7] Henneberger G., Blissenbach R. *Transverse flux motor with high specific torque and efficiency for direct drive of an electric vehicle*, Proc. ISATA, 1999, Vienna, Austria
- [8] Dubois M. R. J. *Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines*. Thesis, Delft University, 2004. ISBN 0-9734585-0-X
- [9] Svechkarenko D. *On Analytical Modeling and Design of a Novel Transverse Flux Generator for Offshore Wind Turbines*. Licentiate Thesis. KTH Electrical engineering, Sweden 2007. ISBN 978-91-7178-682-1
- [10] Chang J., Lee J., Kim J., Chung S., Kang D., Weh H. *Development of rotating type transverse flux machine*. IEMDC, 2007.
- [11] Werner U., Vinogradski M., Orlik B. *Simulation und Entwurf eines analytischen Modells für eine permanentmagneterregte Transversalflussmaschine in Sammler-Bauweise*. VDI/VDEETG-Tagung, Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, Fulda, 2004.
- [12] Hackmann W., Binder A. *Außenläufer-Transversalflussmaschinen für Radnabenantriebe in Straßenbahnen*. VDI/VDEETG-Tagung, Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, Fulda, 2004.
- [13] Henneberger G., Bork M. *Development of a new transverse flux motor*. IEE Colloquium on New Topologies for Permanent Magnet machines, 1997.

Publikace autora související s dizertační prací

- [14] Höll J. *New trends in production of the electric motors for material handling applications*. In proceeding Int. Conference on Low voltage electrical machines, p. 94 – 98, Brno, Czech Republic, 2006. ISBN 978-80-214-3560-5.
- [15] Höll J. *Direct drive*. In proceedings of the “Elektromotoren koloqium 2007”, JULI Motorenwerk, p. 99-109., Moravany, Czech Republic 2007.
- [16] Höll J. *Direct drives in material handling application*. In proceeding Int. Conference on Low voltage electrical machines, p. 38 – 41, Brno, Czech Republic, 2007. ISBN 978-80-214-3560-5.
- [17] Höll J. *Direct Drive of a Battery Powered Low Lift Truck*. In proceedings Flux Users Conference. Barcelona, Spain 2008.
- [18] Höll J. *Transversal flux motors with permanent magnets on the rotor surface for direct drive of the low-lift truck*. In proceedings Flux Users Conference, Autrans, France, 2009.
- [19] Höll J. *Comparison of various motor topologies for direct drive of a low lift truck*. In proceeding Int. Conference on Low voltage electrical machines, p. 8 – 11, Brno, Czech Republic 2009. ISBN 978-80-214-3975-7.
- [20] Höll J., Maňa M., Wilda L. a kol. *Přímý pohon manipulačního vozíku*. Závěrečná zpráva projektu Tandem FT - TA3/120, Moravany, 2010.

CURRICULUM VITAE

Jméno: Jan Höll

Narozen: 25. 4. 1981 v Brně

Kontakt: jan.holl@seznam.cz

Vzdělání:

1999 – 2004 Magisterské studium na FEKT VUT v Brně, obor Silnoprůdák
elektrotechnika a elektroenergetika
diplomová práce: Návrh synchronního motoru s PM na rotoru
v bezdrátkovém provedení, práce obhájena v červnu 2004

od 2006 Kombinované doktorské studium FEKT VUT v Brně, obor Silnoprůdák
elektrotechnika a elektroenergetika
státní doktorská zkouška složena v květnu 2009

Účast na řešení projektu:

- Nízkonákladový pohon zdvihu se spínaným reluktančním motorem, FI-IM3/153
- Přímý pohon manipulačního vozíku, FT – TA3/120

Praxe:

od 2004 JULI Motorenwerk, s.r.o, pracovník vývojového oddělení