

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**Ing. Milan Uhrík**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**ROZBOR VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ  
VYUŽÍVAJÍCÍCH PERMANENTNÉ MAGNETY  
NA TVORBU POĽA A ICH NÁVRH**

**na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)**

**v doktorandskom študijnom programe: 5.2.11 Silnoprúdová elektrotechnika**

**Miesto a dátum: Bratislava, august 2012**

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Oddelení silnoprúdovej elektrotechniky ÚEAE FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Milan Uhrík**  
**ÚEAE FEI STU**  
**Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava**

Školiteľ: **doc. Ing. Ľudovít Hüttner, PhD.**  
**ÚEAE FEI STU**  
**Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava**

Oponenti: **doc. Ing. Pavol Rafajdus, PhD.**  
**Elektrotechnická fakulta – KVES**  
**Žilinská univerzita v Žiline**  
**Univerzitná 1, 010 26 Žilina**

**prof. Ing. Ľudovít Klug, PhD.**  
**Časť studené 996**  
**900 46 Most pri Bratislave**

(meno a priezvisko oponenta s uvedením jeho titulov a názov ustanovizne, s ktorou je oponent v pracovnom pomere)

Autoreferát bol rozoslaný: .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná: ..... o ..... hod.**  
**na Ústave energetiky a aplikovanej elektrotechniky FEI STU, Ilkovičova 3, Bratislava.**

.....  
**doc. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.**  
dekan

## Obsah

<b>Tézy a ciele dizertačnej práce</b>	4
<b>1 Úvod</b>	4
<b>2 Typy diskových motorov</b>	5
2.1 Diskové motory s interným statorom	5
2.2 Diskové motory s interným rotorom	5
<b>3 Analýza magnetických obvodov diskových motorov</b>	5
<b>4 Návrh diskových motorov s PM na rotore</b>	6
4.1 Výpočet rozmerov rotora a permanentných magnetov	6
4.2 Voľba počtu drážok statora	6
4.3 Určenie koeficientu rozptylu PM	7
4.4 Výpočet parametrov vinutia	7
4.5 Výpočet prierezu vodičov a rozmerov drážky	7
4.6 Výpočet odporov a rozptylovej indukčnosti statorového vinutia	8
4.7 Výpočet reakcie kotvy a synchrónnych reaktancií	8
4.8 Výpočet strát v diskovom motore	9
4.9 Simulácia prevádzkových charakteristík motora	9
<b>5 Identifikácia parametrov diskových motorov</b>	10
<b>6 Diskové motory napájané z meničov frekvencie</b>	10
6.1 Straty vo vinutí a v železe pre nesínusové napájanie	10
6.2 Výpočet prevádzkových charakteristík pre nesínusové napájanie	11
<b>7 Termálna analýza diskových motorov</b>	11
<b>8 Zvlnenie momentu diskových motorov</b>	11
8.1 Zošíkmenie hrán magnetov a drážok statora	12
8.2 Asymetrie v magnetických obvodoch	12
<b>9 Radiálne magnetické toky v jarme diskového motora</b>	13
9.1 Vplyv hrúbky izolácie medzi plechmi na straty v železe	13
<b>10 Vinutia diskových motorov</b>	14
<b>11 Záver</b>	15
<b>Vedecký a praktický prínos práce</b>	15
<b>Summary</b>	15
<b>Zoznam použitej literatúry</b>	16
<b>Publikácie autora</b>	19

## Tézy a ciele dizertačnej práce

Dizertačná práca sa zaoberá elektrickými strojmi s diskovým rotorom budenými pomocou permanentných magnetov, metodikou ich návrhu a optimalizáciou ich parametrov. Na základe analýzy súčasného stavu znalostí v oblasti elektrických strojov a aktuálnych požiadaviek priemyslu boli stanovené nasledujúce tézy dizertačnej práce:

1. Analýza a identifikácia vlastností skúmaného diskového motora
2. FEM analýza radiálnych magnetických polí v jarme diskového motora
3. Vyhodnotenie vplyvu asymetrií v magnetickom obvode diskového motora na zvlnenie momentu a vibrácie
4. Porovnanie elektrických a ekonomických parametrov rôznych typov vinutí používaných v diskových motoroch
5. Analýza možnosti použitia klietkového rozbehového vinutia na rotore diskového motora

## 1 Úvod

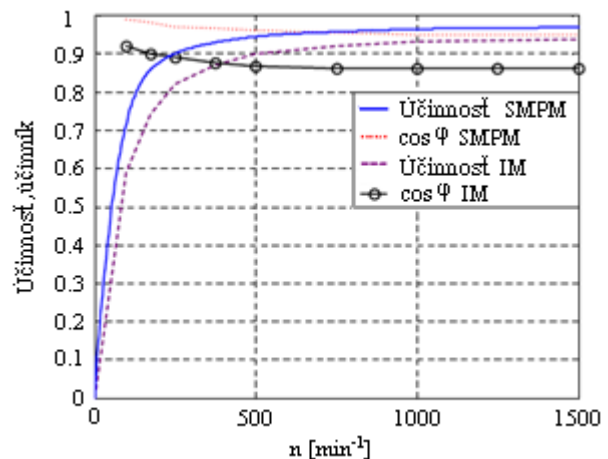
Hoci sú stroje s PM už bežne dostupné na trhu, stále najrozšírenejším motorom v súčasnosti zostáva asynchrónny motor (ASM). Nevýhodou ASM je, že na vytvorenie momentu potrebujú odoberať činný aj jalový prúd, čo znižuje ich účinník, účinnosť a kladie väčšie nároky na výkon meniča. Synchronne motory s permanentnými magnetmi (SMPM) majú lepšie technické parametre, nižšiu spotrebu, dajú sa jednoduchšie a lacnejšie riadiť.

Hlavnou nevýhodou SMPM zostáva ich nižšia prevádzková teplota a vyššia cena, najmä pri použití kvalitnejších  $SmCo$ , alebo  $NdFeB$  magnetov. Ceny PM na globálnom trhu však neustále klesajú a očakáva sa, že v budúcnosti nájdu SMPM rozsiahle uplatnenie, najmä v elektrickej trakcii.

Porovnanie účinnosti a účinníka SMPM motora a ASM s rovnakým výkonom je znázornené na Obr. 1.1 (Parviainen, 2005). SMPM má zvyčajne vyššiu účinnosť a účinník ako ASM. SMPM možno rozdeliť na stroje s valcovým rotorom a stroje s diskovým rotorom s axiálnym magnetickým tokom (DMPM).

Z výsledkov porovnania objemov diskových a radiálnych SMPM (Parviainen, 2005) vyplýva, že DMPM majú nižší objem, keď je štíhlostný pomer  $k_l = \text{dĺžka}/\text{priemer}$  radiálnych SMPM malý (t.j. motor je krátky) a zároveň keď je počet pólov väčší.

DMPM majú vo všeobecnosti vyššiu výkonovú hustotu, vyžadujú si menší objem PM ako radiálne SMPM a takisto spotreba železa na statore je nižšia. Na druhej strane však majú vyššiu spotrebu medi a nižšiu účinnosť. Vývoj nových kompozitných materiálov však naďalej znižuje výrobné náklady DM a umožňuje plné využitie ich potenciálu. Príkladom sú DM YASA<sup>TM</sup>, ktoré dosahujú momentovú hustotu vyše 30 Nm/kg.



Obr. 1.1. Porovnanie SMPM a indukčného motora



Obr. 1.2. DM zabudovaný v kolese

## 2 Typy diskových motorov

Diskové motory sa v súčasnosti vyrábajú prevažne v prevedeniach znázornených na Obr. 2.1. Jednostranné DM nie sú veľmi bežné, pretože v nich vzniká nevyvážená axiálna sila pôsobiaca na rotor. Rotor DM môže byť vyrobený buď z feromagnetického materiálu s PM nalepenými na povrchu, alebo zo živice (neferomagnetického materiálu) so zapustenými PM.

### 2.1 Diskové motory s interným statorom

DM s vnútorným statorom (Obr. 2.1. a) sú používané najmä v aplikáciách, kde je hriadeľ so statorom pevne uchytená a otáča sa vonkajší rám motora. Interný stator môže byť buď drážkový, alebo bezdrážkový s toroidným vinutím. Tieto motory sa používajú napríklad na pohon výťahov (Ficheux et al., 2001), alebo v elektrickej trakkii (Caricchi et al., 1994).

### 2.2 Diskové motory s interným rotorom

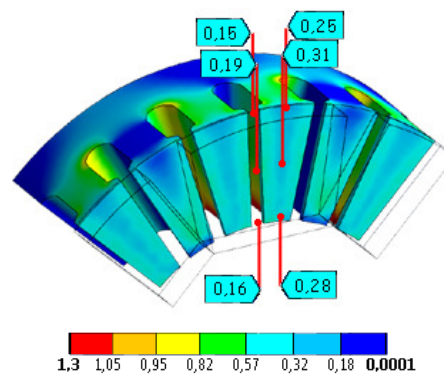
DM s interným rotorom (Obr. 2.1. b) môžu mať PM buď nalepené na feromagnetickom rotorovom jadre, alebo zabudované vo vnútri nemagnetického materiálu. V prípade neferomagnetických rotorov je pomer synchronných reaktancií  $X_{sd}/X_{sq} \approx 1$ , čiže motor môže byť považovaný za stroj s nevyjadrenými pólmi.



Obr. 2.1. a) DMPM s interným statorom b) DMPM s interným rotorom

## 3 Analýza magnetických obvodov diskových motorov

Na analýzu magnetického obvodu diskového motora sa použili reluktančné siete a FEM analýza. Reluktančná sieť analyzovaného DM bola vytvorená v programe *Matlab/Simulink* pomocou blokov knižnice *SimPowerSystems*, pričom výsledky získané týmto prístupom sa prakticky zhodovali s výsledkami z 2D FEM analýzy. V 2D FEM analýze DM sa uvažovalo viacero rezov, čím bolo možné získať tzv. kvázi 3D rozloženie magnetického poľa (Cvetkovski et al., 2006). Geometrické rozmery a vlastnosti materiálov zodpovedali reálnym parametrom analyzovaného DM. Pre získanie presnej distribúcie magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere bola pre diskový motor analyzovaný v tejto práci vykonaná aj 3D FEM analýza jedného pólového páru motora v stave naprázdno. Výsledky 3D FEM analýzy spolu s experimentálne nameranými hodnotami sú na Obr. 3.1. Odchýlky medzi nameranými a vypočítanými hodnotami boli spôsobené najmä citlivosťou použitého Teslametru.

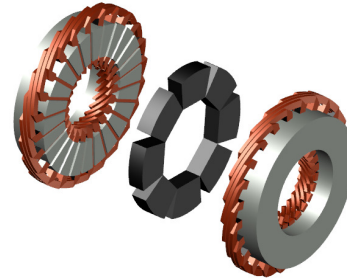


Obr. 3.1. Indukcia v statore a vo vzduchovej medzere DM v stave naprázdno (v Tesla)

## 4 NÁVRH DISKOVÝCH MOTOROV S PM NA ROTORE

Cieľom tejto kapitoly je predstaviť kompletný postup návrhu DMPM, pričom hlavný dôraz je kladený na návrh rozmerov a elektromagnetického obvodu stroja (Obr. 4.1).

Keďže analyzovaný prototyp DM nemal uvedené štítkové údaje a jeho parametre neboli známe, tak návrh bol v skutočnosti realizovaný ako spätný prepočet. Kvôli prehľadnosti je však výpočet uvedený v chronologickom poradí tak, ako keby sa jednalo o priamy návrh. V texte je priamo pri rovniciach uvedený aj výpočet parametrov motora. Vďaka tomu môže vypracovaný postup slúžiť zároveň ako praktický návod a príklad aj pre iné návrhy.



Obr. 4.1. Navrhovaný diskový motor

Predpokladá sa, že sú požadované nasledovné parametre DM:  $P_n = 300 \text{ W}$ ,  $U_n = 180 \text{ V}_{AC}$ ,  $M_n = 0,95 \text{ Nm}$ ,  $n_n = 3000 \text{ ot/min}$ ,  $k_{pr} = 1,5$ ,  $f_n = 200 \text{ Hz}$ ,  $2p = 8$ ,  $\cos \varphi \geq 0,9$ ,  $\eta \geq 0,8$ . Požadovaná krátkodobá momentová preťažiteľnosť je  $k_{pr} = 1,5$ . Vinutie je zapojené do hviezdy s izoláciou triedy B.

### 4.1 Výpočet rozmerov rotora a permanentných magnetov

Na rotore sa uvažuje s použitím feritových permanentných magnetov s parametrami  $B_r = 0,33 \text{ T}$  a  $H_c = 146 \text{ kA/m}$ . Merná elektrická vodivosť feritov je  $\sigma_{PM} < 0,0001 \text{ S/m}$  a relatívna permeabilita PM je  $\mu_{r,PM} = 1,1$ . Koeficient pólového krytia na strednom polomere bol zvolený  $\alpha_{pk} = 0,88$ . Potom koeficient tvaru budiaceho poľa je  $k_f = 1,25$  a koeficient reakcie kotvy  $k_{ad} = 0,8$ . Pre podbudovaný synchronný motor daného výkonu sa podľa (Gieras, et al., 1998) volí hodnota stupňa budenia motora  $\varepsilon = 0,76$ . Koeficient prúdového zaťaženia motora je  $k_{Im} = 1,653$ . Odhadovaný koeficient využitia PM pre použité ferity je  $\xi = 0,32$ . Teoreticky požadovaný minimálny objem PM pre daný výkon motora možno získať ako:

$$V_{PM} \cong \frac{2}{\pi^2} \cdot \frac{k_f k_{ad} (1 + \varepsilon) k_{pr}}{f_n B_r H_c \xi k_{Im}} \cdot \frac{P_n}{\eta \cos \varphi} = 43\,732 \text{ mm}^3 \quad (4.1)$$

Kvôli rezerve na rozptylové toky je reálny objem PM v motore väčší  $V_{PM} = 61\,580 \text{ mm}^3$ . Predbežne zvolená dĺžka PM je  $h_{PM} = 12 \text{ mm}$ . Na 1 magnetický pól bude pripadať plocha  $S_{PM} = 641 \text{ mm}^2$ . Optimálny pomer vnútorného a vonkajšieho priemeru rotora za účelom maximalizácie momentu by mal byť rovný  $1/\sqrt{3} \approx 0,58$  (Gieras, et al., 2004). Vonkajší priemer rotora je:

$$D_{out} = \sqrt{\frac{4V_{PM}}{\pi h_{PM} \alpha_{pk} (1 - k_d^2)}} \cong 106 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Vnútorňý priemer rotora potom bude  $D_{in} = k_d D_{out} \cong 62 \text{ mm}$  a stredný priemer rotora  $D_{avg} = 0,5(D_{in} + D_{out}) = 84 \text{ mm}$ .

### 4.2 Voľba počtu drážok statora

Vzhľadom k pomerne malým rozmerom stroja sa volí počet drážok na pól a fázu  $q = 1$ . Počet drážok pre 1 stator potom bude  $Z_{S1} = 2pmq = 24$ . Za účelom zníženia pulzácií momentu sa k zvolenému počtu drážok sa pridáva navyše ešte 1 voľná drážka. Celkový počet drážok statora teda bude:  $Z_S = Z_{S1} + 1 = 25$ .

Stredný pólový rozstup motora v jednotkách dĺžky je:

$$\tau = \frac{\pi D_{avg}}{2p} = 32,98 \text{ mm} \quad (4.3)$$

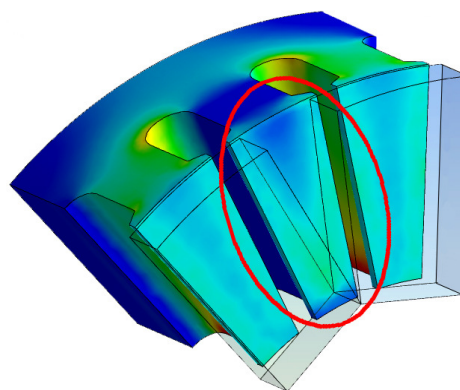
Zvolená šírka drážky je  $b_{ds} = 6 \text{ mm}$  a otvorenie drážky je  $b_0 = 2,5 \text{ mm}$ . Potom hodnota Carteroveho koeficientu vypočítaná podľa (Gieras, et al., 2004) bude  $k_C = 1,016$ . Fiktívna vzduchová medzera zohľadňujúca vplyv drážkovania bude  $\delta' = 2\delta k_C = 1,016 \text{ mm}$ .

### 4.3 Určenie koeficientu rozptylu PM

Rozptylové magnetické toky PM znižujú užitočný magnetický tok a sú tiež zdrojom zvlnenia momentu (Studer et al., 1997). Na presné určenie koeficientu rozptylu PM sa použila 3D FEM analýza (Obr. 4.2). Koeficient rozptylu magnetického toku  $\sigma_{IPM}$  je možné určiť ako:

$$\sigma_{IPM} = \frac{\Phi_{PM}}{\Phi_{\delta}} = \frac{0,1953 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{0,1702 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}} = 1,15 \quad (4.4)$$

kde  $\Phi_{PM}$  je vypočítaný magnetický tok od PM a  $\Phi_{\delta}$  je magnetický tok cez stred vzduchovej medzery. Magnetický tok, ktorý je však skutočne spriahnutý so závitom vinutia je  $\Phi_p = 0,1194 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ .



Obr. 4.2. Znázornenie magnetických skratov cez koruny zubov statora

### 4.4 Výpočet parametrov vinutia

Pri návrhu vinutia sa predpokladalo, že na obidvoch statoroch bude použité 2-vrstvové vlnové vinutie s plným krokom. Činiteľ rozloženia viacfázového vinutia v prípade  $q = 1$  a  $m_1 = 3$  je presne  $k_{vr} = 1$ . Činiteľ kroku v prípade vinutia s plným krokom (koeficient skrátania kroku  $\beta = 1$ ) je rovný  $k_{vy} = 1$ . Výsledný koeficient vinutia bude  $k_v = k_{vr}k_{vy} = 1$ . Magnetický tok na pól pri predpokladanej prevádzkovej teplote motora  $90^\circ\text{C}$  bude  $\Phi_{p90^\circ\text{C}} = 0,111 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ . Počet závitov na jednu fázu motora po zaokrúhlení tak bude:

$$N_{zfm} = \frac{\varepsilon U_n / \sqrt{3}}{\pi \sqrt{2} f_n k_v \Phi_{p90^\circ\text{C}}} = 800,77 \doteq 800 \quad (4.5)$$

Počet závitov na fázu jedného statora bude  $N_{zf} = N_{zfm}/2 = 400$ . Počet cievok dvojvrstvého vinutia bude rovný počtu aktívnych drážok statora  $N_c = Z_{s1} = 24$ . Počet cievok na fázu  $N_{cf} = N_c/m_1 = 8$ . Počet závitov na cievku bude  $N_{zc} = N_{zf}/N_{cf} = 50$ . Prepočítaný počet závitov v sérii na fázu jedného statora  $N_{zf} = N_{cf}N_{zc} = 400$ . Počet vodičov v drážke pre dvojvrstvové vinutie  $N_v = 2N_{zc} = 2 \cdot 50 = 100$ .

### 4.5 Výpočet prierezu vodičov a rozmerov drážky

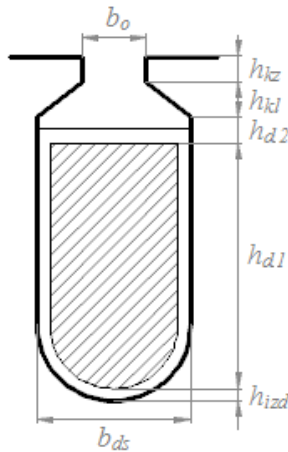
Odhadovaný menovitý prúd motora pri predpokladanej účinnosti a účinníku je:

$$I_n = \frac{P_n}{m U_n f \eta \cos \varphi} = 1,336 \text{ A} \quad (4.6)$$

Oteplenie drážkovej časti vinutia závisí na súčine lineárnej hustoty prúdu  $A$  a hustoty prúdu vo vinutí  $J$  (tzv.  $AJ$  kritérium). Pre zvolenú prúdovú hustotu  $J = 7 \text{ A/mm}^2$  vychádza hodnota súčinu  $AJ = 115 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{m}^3$ , čo spĺňa empirické teplotné kritérium (Kopylov, et



al., 1980). Potrebný prierez vodiča statorového vinutia potom bude  $S_v = I_n/J = 0,1908 \text{ mm}^2$ . Najbližší normalizovaný medený drôt má prierez  $S_v = 0,1963 \text{ mm}^2$ . Udávaný merný odpor drôtu je v intervale  $R_{Cu} = 0,08462 \div 0,08959 \text{ } \Omega/m$  (Copper Plus s.r.o., 2012). Zvolený koeficient plnenia drážky je  $k_{pd} = 0,4$ . Vypočítané rozmery drážky sú uvedené na Obr. 4.3.



#### 1-vrstvové vinutie:

(resp. 2-vrstvové vinutie bez skrátenia kroku)

šírka drážky:  $b_{ds} = 6,0 \text{ mm}$

otvorenie drážky:  $b_o = 2,5 \text{ mm}$

výška koruny zuby:  $h_{kz} = 1,2 \text{ mm}$

hrúbka drážkového klinu:  $h_{kl} = 1,2 \text{ mm}$

výška neaktívnej časti drážky:  $h_{d2} = 0,5 \text{ mm}$

výška aktívnej časti vinutia:  $h_{d1} = 10,5 \text{ mm}$

hrúbka drážkovej izolácie:  $h_{izd} = 0,2 \text{ mm}$

celková výška drážky:  $h_{ds} = 13,6 \text{ mm}$

**Obr. 4.3.** Rozmery polootvorenej oválnej drážky diskového motora

Za predpokladu, že maximálna hodnota indukcie v statorovom jarme bude dosahovať hodnotu  $B_{jsmax} \leq 0,8 \text{ T}$  je možné vypočítať minimálnu výšku jarma statora nasledovne:

$$h_{js} \geq \frac{\Phi_p}{B_{jsmax}(D_{out} - D_{in})k_{Fe}} = 3,53 \text{ mm} \quad (4.7)$$

kde  $k_{Fe} = 0,96$  je koeficient plnenia statorových plechov. Vzhľadom k výške zubov a po pripočítaní priestoru na sťahovacie skrutky sa však volí  $h_{js} = 12 \text{ mm}$ .

#### 4.6 Výpočet odporov a rozptylovej indukčnosti statorového vinutia

Na analytický výpočet statorových odporov bol použitý prístup spočívajúci v rozdelení celého vinutia na časť uloženú v drážkach a časť prislúchajúcu čelám. Vypočítaný odpor fázy vinutia motora pri teplote  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  je  $R_{f20^\circ\text{C}} = 10,522 \text{ } \Omega$ . Pri uvažovaní zvýšenej pracovnej teploty motora by hodnoty odporov stúpli na  $R_{f90^\circ\text{C}} = 13,410 \text{ } \Omega$  a  $R_{f130^\circ\text{C}} = 15,061 \text{ } \Omega$ .

Výpočet celkovej rozptylovej indukčnosti vinutia pozostáva z výpočtov pomerných magnetických vodivostí. Výhodiskom pre výpočet boli vzťahy uvedené v knihách (Gieras, et al., 2004) a (Kopylov, et al., 1980). Celkovú rozptylovú indukčnosť jednej fázy statora je možné vypočítať pomocou získaných špecifických permeancií nasledovne:

$$L_{1\sigma} = 2\mu_0 \frac{L_i N_{zf}^2}{pq} \left( \lambda_d + \frac{l_c}{L_i} \lambda_c + \lambda_{dif} \right) = 5,853 \text{ mH} \quad (4.8)$$

kde  $L_i = R_{out} - R_{in}$  je dĺžka vodiča v drážke,  $l_c$  je celková dĺžka čiel cievky.  $\lambda_d$  predstavuje špecifickú permeanciu drážkového rozptylu vinutia,  $\lambda_c$  predstavuje špecifickú permeanciu rozptylu čiel vinutia a  $\lambda_{dif}$  predstavuje špecifickú permeanciu diferenčného rozptylu.

#### 4.7 Výpočet reakcie kotvy a synchronných reaktancií

Synchronná fázová indukčnosť sa skladá z rozptylovej indukčnosti a z indukčnosti reakcie kotvy. Vypočítaná indukčnosť reakcie kotvy je v prípade rotora z neferomagnetického materiálu rovnaká  $L_{1a} = L_{1aq} = L_{1ad} = 1,864 \text{ mH}$ . Celková synchronná indukčnosť bude:



$$L_{1s} = L_{1a} + L_{1\sigma} = 7,717 \text{ mH} \quad (4.9)$$

Výsledná synchronná reaktancia jednej fázy motora (2 statorov) pre nominálnu frekvenciu je:

$$X_s = X_{sd} = X_{sq} = 2\pi f_n (2L_{1s}) = 19,39 \ \Omega \quad (4.10)$$

#### 4.8 Výpočet strát v diskovom motore

Straty v navrhnutom diskovom motore sú tvorené najmä stratami v statorovom vinutí, stratami v železe, mechanickými stratami a prídavnými stratami. Tepelné straty vo vinutí pri sériovom zapojení statorov pri predpokladanej pracovnej teplote motora 90 °C sú:

$$\Delta P_{Cu90^\circ\text{C}} = m_1 I_n^2 R_{f90^\circ\text{C}} = 71,81 \text{ W} \quad (4.11)$$

Statory navrhnutého motora sú vyrobené z plechov s mernými stratami  $\Delta p_{1/50} = 1,3 \text{ W/kg}$ . Koeficient vyjadrujúci vplyv technológie výroby a nerovnomernosti rozloženia toku na straty v zuboch je  $k_{dz} \approx 1,8$  a na straty v jarme  $k_{dj} \approx 1,6$ . Na základe objemov odčítaných z CAD programu sa vypočítala hmotnosť železa v zuboch  $m_{zs}$  a v jarme  $m_{js}$ . Stredné hodnoty indukcií v zuboch  $B_{zs}$  a v jarme  $B_{js}$  boli vypočítané z 2D FEM analýzy. Celkové straty v železe sa vypočítajú podľa nasledujúceho vzťahu:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta p_{1/50} \left(\frac{f_n}{50}\right)^{\frac{4}{3}} (k_{dz} B_{zs}^2 m_{zs} + k_{dj} B_{js}^2 m_{js}) = 2,81 \text{ W} \quad (4.12)$$

Keďže na rotore sú použité feritové PM, ktorých elektrická vodivosť je veľmi malá  $\sigma_{PM} < 0,0001 \text{ S/m}$ , straty vírivými prúdmi v magnetoch prakticky nevznikajú a  $\Delta P_{PM} = 0$ . Mechanické straty pozostávajú zo strát v ložiskách  $\Delta P_{tr}$ , zo strát trením o vzduch  $\Delta P_{vzd}$  a z ventilačných strát  $\Delta P_{vent}$ . Výpočet mechanických strát navrhovaného DM podľa (Gieras, et al., 2004) vyšiel ako  $\Delta P_{mech} = \Delta P_{tr} + \Delta P_{vzd} + \Delta P_{vent} = 3,6 + 0,77 + 0 = 4,37 \text{ W}$ .

Prídavné straty zahŕňajú vysokofrekvenčné straty v železe, pulzačné straty v zuboch, straty vírivými prúdmi vo vodičoch, atď. Odhadovaná hodnota prídavných strát pre navrhovaný motor je 0,5 % výkonu (Gieras, 1998), čiže  $\Delta P_{prid} = 0,005 P_n = 1,5 \text{ W}$ .

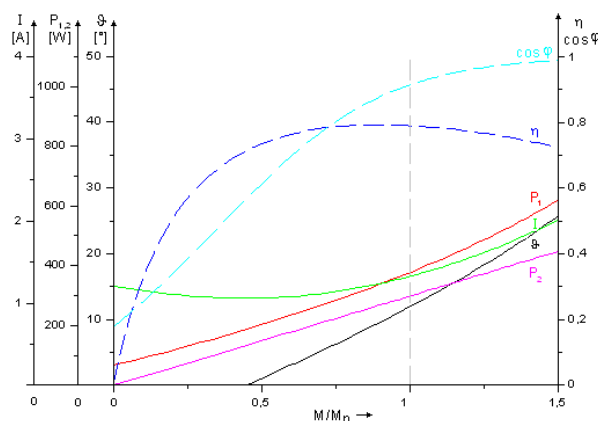
Celkové straty v diskovom motore sú súčtom jednotlivých strát:

$$\Delta P = \Delta P_{Cu90^\circ\text{C}} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{PM} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{prid} = 80,49 \text{ W} \quad (4.13)$$

#### 4.9 Simulácia prevádzkových charakteristík motora

Na výpočet prevádzkových charakteristík motora sa použil skript v programe Matlab, do ktorého boli naprogramované rovnice opisujúce elektrické a dynamické javy v DM. Výsledné prevádzkové charakteristiky pre pracovný interval motora sú uvedené na Obr. 4.4.

Nominálne údaje navrhnutého motora spĺňajú počiatočné požiadavky návrhu. Vypočítané pracovné charakteristiky sú priebežne konfrontované s experimentálne nameranými hodnotami v kapitole 5. *Identifikácia parametrov diskových motorov.*



Obr. 4.4. Prevádzkové charakteristiky navrhnutého DMPM ( $M_n = 0,95 \text{ Nm}$ )

## 5 Identifikácia parametrov diskových motorov

Príručku k meraniam na diskovom motore tvorila kniha (Hrabovcová, Rafajdus, et al., 2004) a článok zaoberajúci sa identifikáciou parametrov DMPM (Cavagnino, et al., 2000).

Z nameranej charakteristiky naprázdno v generátorickom režime je možné vypočítať maximálnu hodnotu magnetického toku  $\Psi_M$  spriahnutého závitmi jednej fázy motora:

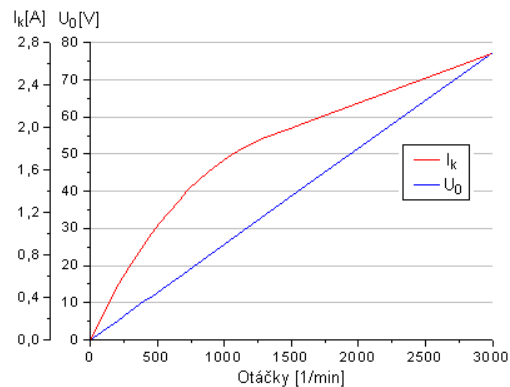
$$\Psi_{max} = \frac{\sqrt{2}U_{0fn}}{\omega_n} = 0,087 \text{ Wb}$$

kde  $\omega_n$  predstavuje elektrickú uhlovú rýchlosť a  $U_{0fn}$  efektívnu hodnotu indukovaného napätia jednej fázy vinutia v stave naprázdno pri nominálnych otáčkach.

Po vydelení počtom závitov fázy  $N_{zfm} = 800$  sa získala maximálna hodnota magnetického toku na pól  $\Phi_p = 0,1194 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ . Výsledné porovnanie vypočítaných a nameraných hodnôt je uvedené v Tab. 5.1.

**Tab. 5.1.** Porovnanie vypočítaných a nameraných parametrov DMPM

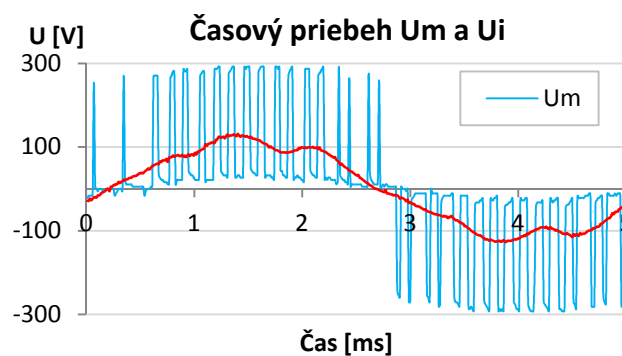
Parameter	Vypočítaná hodnota	Nameraná hodnota
Fázový odpor $R_{f20^\circ\text{C}}$	10,52 $\Omega$	10,2 $\Omega$
Synchrónna fázová indukčnosť $L_S$	15,45 mH	16,0 mH
Rozptylová fázová indukčnosť $L_\sigma$	11,72 mH	9,6 mH
Magnetický tok na pól $\Phi_{p20^\circ\text{C}}$	$0,1194 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$	$0,1088 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$
Indukované napätie naprázdno $E_f$	78,935 V	77,36 V
Moment zotrvačnosti rotora $J_m$	$0,6208 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$	$0,643 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$



**Obr. 5.1.** Namerané charakteristiky naprázdno a nakrátko v generátorickom režime

## 6 Diskové motory napájané z meničov frekvencie

Pri napájaní SMPM z meniča s neharmonickým výstupným napätím prichádza k zvyšovaniu strát a k zmene prevádzkových charakteristík motora. Preto bola vytvorená modifikácia výpočtu prevádzkových charakteristík, ktorá vychádza zo znalosti priebehu napätia na výstupe FM. Na napájanie DM bol použitý menič VACON NXL, ktorého priebeh napätia je znázornený na Obr. 6.1. Efektívna hodnota napätia je 180 V pri frekvencii 200 Hz.



**Obr. 6.1.** Namerané časové priebehy napätia meniča  $U_m$  a spätného indukovaného napätia motora  $U_i$ .

### 6.1 Straty vo vinutí a v železe pre nesínusové napájanie

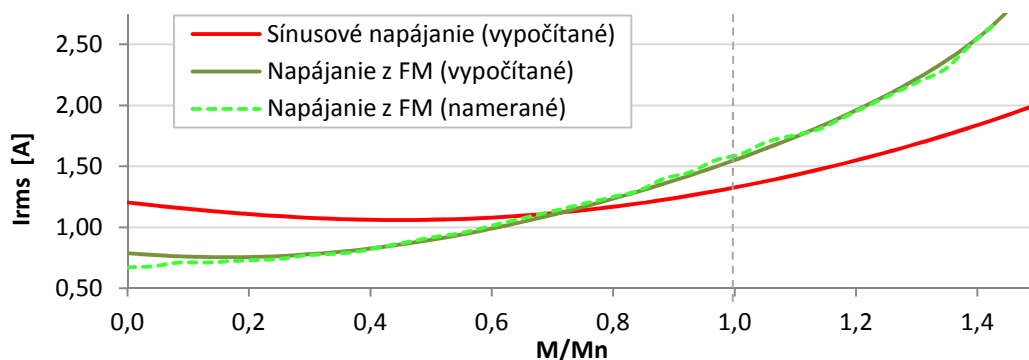
Pri napájaní motora z meniča dochádza k zvýšeniu strát vo vinutí vplyvom vysokofrekvenčných zložiek prúdu. Vypočítané straty vo vinutí pri napájaní z uvedeného FM

sú 129,8 W. Pre frekvenčné spektrum napätia uvažovaného meniča vyšli straty v železe  $\Delta P_{Fe} = 3,16 W$ .

## 6.2 Výpočet prevádzkových charakteristík pre nesínusové napájanie

Výpočet prevádzkových charakteristík predpokladá, že sú známe priebehy a frekvenčné spektrá výstupného napätia použitého FM a indukovaného napätia motora (Obr. 6.1).

Výpočet prevádzkových charakteristík sa modifikoval tak, že sa v každom kroku uvažuje zvlášť s efektívnymi hodnotami od daných harmonických  $U_{nf}$  a  $E$ , pričom výsledné veličiny sa získajú opätovným spočítaním jednotlivých harmonických. Výsledné vypočítané charakteristiky sú na Obr. 6.2.

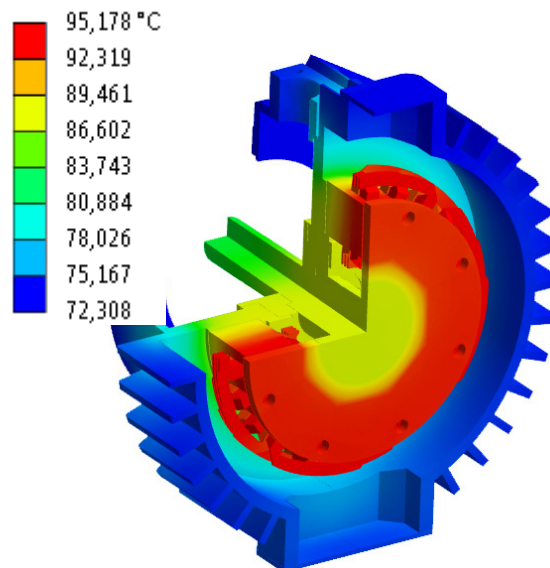


Obr. 6.2. Prúd motora v závislosti na pomernom momentovom zaťažení ( $M_n = 0,95 \text{ Nm}$ )

## 7 Termálna analýza diskových motorov

S tepelnou stabilitou sa uvažovalo priebežne už pri návrhu motora (AJ-kritérium, koeficient demagnetizácie PM, atď.). Teplotný profil motora získaný termodynamickou 3D FEM simuláciou je znázornený na Obr. 7.1. Po praktickej verifikácii výsledkov pre nominálne zaťaženie sa pristúpilo k simulačným analýzám rôznych stavov preťaženia motora.

Ukázalo sa, že motor je pri napájaní z frekvenčného meniča slabší a viac sa prehrieva ako pri napájaní sínusovým zdrojom. Z hľadiska prekročenia dovolenej teploty izolácie triedy B je však motor takmer nemožné tepelne preťažiť. Praktické meranie totiž ukázalo, že pri prekročení teploty vinutia nad  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  sú straty v motore a demagnetizácia PM už tak veľké, že motor vypadne zo synchronizmu a zastaví sa ešte predtým, než sa stihne prehriať.



Obr. 7.1. Teplotný profil motora vypočítaný termodynamickou 3D FEM simuláciou

## 8 Zvlnenie momentu diskových motorov

Diskové motory sú v porovnaní s valcovou konfiguráciou stroja kratšie a majú vyššiu výkonovú hustotu, ale kvôli obmedzenému obvodu statora na vnútornom polomere je v nich možné použiť len relatívne malý počet drážok. V porovnaní s komutátorovými motormi je

u bezkefových motorov na kotve málo drážok, najčastejšie len 1 a maximálne 2 drážky na pól a fázu, čo môže viesť k značným pulzáciám momentu.

### 8.1 Zošikmenie hrán magnetov a drážok statora

Jedným zo základných spôsobov redukcie zvlnenia momentu je použitie PM tvarovaných tak, aby ich hrany neboli rovnobežné so statorovými drážkami. Výsledky 3D FEM simulácií pre rôzne tvary PM (Tab. 8.1) sú uvedené na Obr. 8.1 (Uhrík, 2011c). Všetky PM mali rovnakú plochu pólu. Okrem rôzne veľkého zvlnenia reluktančného momentu sa odlišovali tiež rôznym koeficientom rozptylu, ktorý bol závislý od zarovnania magnetov s drážkami statora. Segmentové, lichobežníkové a sínusové magnety vyvolávajú pomerne veľké zvlnenie momentu. Ich nevýhodou je, že sú geometricky symetrické okolo stredovej osi, čím sa priestor pre zošikmenie hrán obmedzuje. U kruhových PM je zvlnenie momentu menšie najmä vďaka tomu, že vzdialenosti medzi magnetmi sú veľké. Najnižší reluktančný moment je v prípade kosodĺžnikových PM. Vďaka antisymetrickej geometrii je tu totiž možné doceliť väčší uhol zošikmenia hrán magnetov. Zo získaných výsledkov je však zrejmé, že aj v najlepšom prípade je výsledné zvlnenie momentu pomerne veľké vzhľadom k nominálnemu momentu motora (11,5 % v amplitúde). Chod takéhoto motora by bol trhaný a vznikali by veľké vibrácie.

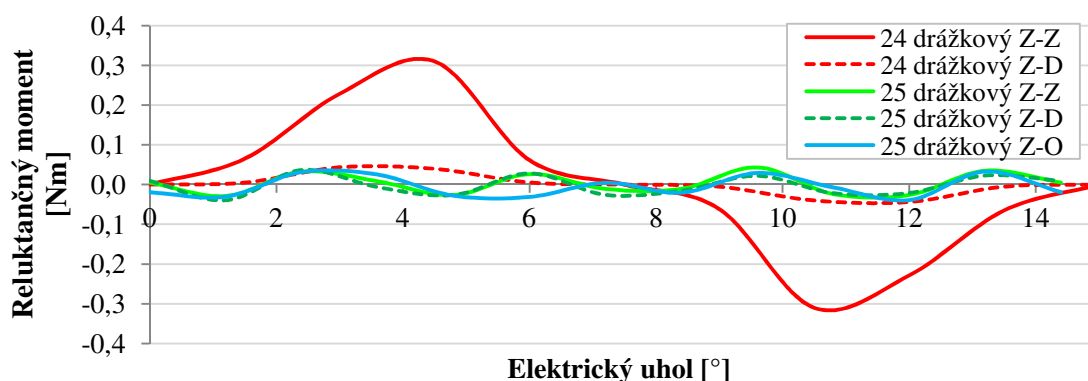
**Tab. 8.1.** Porovnanie koeficientov rozptylu pre rôzne tvary PM

Tvar PM	Koeficient rozptylu PM
 Segmentový	1,03 – 1,35
 Lichobežníkový	1,03 – 1,30
 Kosodĺžnikový	1,07 – 1,39
 Sínusový	1,06 – 1,39
 Kruhový	1,05 – 1,23

### 8.2 Asymetrie v magnetických obvodoch

Dodatočné vyhladenie momentu je možné dosiahnuť zavedením asymetrií do konštrukcie stroja. Hlavným princípom je, že magnety nevchádzajú pod drážky naraz, ale s rôznym fázovým posunom. Nevýhodou asymetrií je, že špičkový výkon stroja klesá a že sa v ňom začnú objavovať harmonické zložky, ktoré by inak neboli prítomné.

Najjednoduchším spôsobom ako zaviesť asymetriu do konštrukcie DM je použiť vzájomné natočenie statorov (červená farba na Obr. 8.1). Ďalším zvýraznením asymetrie je pridanie voľnej drážky do statora (zelená farba na Obr. 8.1). Tým sa dosiahne dokonalý posun medzi fázami, v ktorých PM vstupujú pod jednotlivé drážky. Navyše sa tým zmenší aj koeficient diferenčného rozptylu  $\tau_{dif}$  (Klug a Guba, 1992).



**Obr. 8.1.** Reluktančný moment pri pohybe magnetu nad jedným zubom v závislosti od počtu drážok a vzájomnej polohy satorov (Zub-Zub, Zub-Drážka, Zub-Otvorenie drážky)

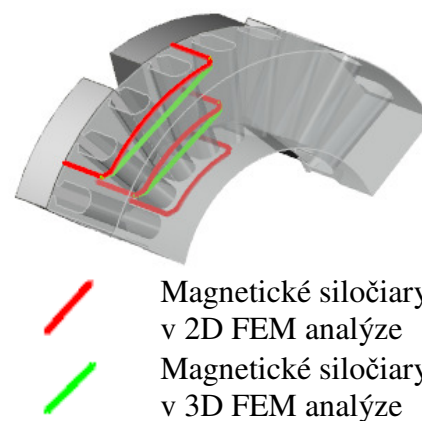
Experimentálne nameraná maximálna hodnota reluktančného momentu DM s 25 drážkovým satorom bola 0,058 Nm, čo približne zodpovedá nasimulovaným hodnotám. Satory s prázdnyimi drážkami je možné takisto vzájomne natočiť tak, že ich prázdne drážky sú navzájom posunuté optimálne o  $180^\circ$  geometrických. V takom prípade je asymetria magnetického obvodu ešte výraznejšia a zvlnenie momentu ešte menšie.

Ideálnym kompromisom medzi zvlnením momentu a výkonom motora sa pre daný DM javí byť použitie 25 drážkových satorov v pozícii zub-zub s voľnými drážkami natočenými vzájomne o  $180^\circ$  geometrických. Pozitívny vplyv asymetrií na zvlnenie momentu potvrdili aj výsledky merania vibrácií motora. Ukázalo sa, že pri vzájomnom natočení satorov do pozície so vzájomne pootočenými prázdnyimi drážkami boli vibrácie motora skutočne najmenšie a jeho beh najhladší.

## 9 Radiálne magnetické toky v jarme diskového motora

Zjednodušovanie 3-rozmernej konštrukcie diskových motorov do 2-rozmerných rovín môže v niektorých prípadoch spôsobiť odchýlku od reálneho riešenia. Rozdiel medzi magnetickým siločiarami uvažovanými v 2D a 3D FEM simulácii diskových motorov je znázornený na Obr. 9.1. Kým 2D simulácia predpokladá, že magnetické siločiare idú vždy presne po obvode satora, v skutočnom 3D priestore prichádza ku klesaniu siločiar smerom k vnútornému polomeru satora. Metóda návrhu diskových motorov využívajúca uvedené zjednodušenie 3D geometrie na niekoľko desiatok 2D rezov je široko používaná a nazýva sa „Kvazi 3D modelovanie“ (Azzouzi et al., 2005). Modelovanie laminácií vo FEM programoch je náročné a väčšinou sa realizuje použitím anizotropickej permeability materiálu.

Pre sator uvažovaného diskového motora zložený z plechov z elektrotechnickej ocele Et130 s hrúbkou 0,35 mm, relatívnou permeabilitou  $\mu_r_{Et130} = 4200$  a koeficientom plnenia železa  $c = 0,96$  vyjde podľa (Meeker, 2009)  $\mu_{r\text{prična}} = 24,86$  a  $\mu_{r\text{pozdĺžna}} = 4032$ .



**Obr. 9.1.** Porovnanie siločiar v 2D FEM a 3D FEM simulácii

### 9.1 Vplyv hrúbky izolácie medzi plechmi na straty v železe

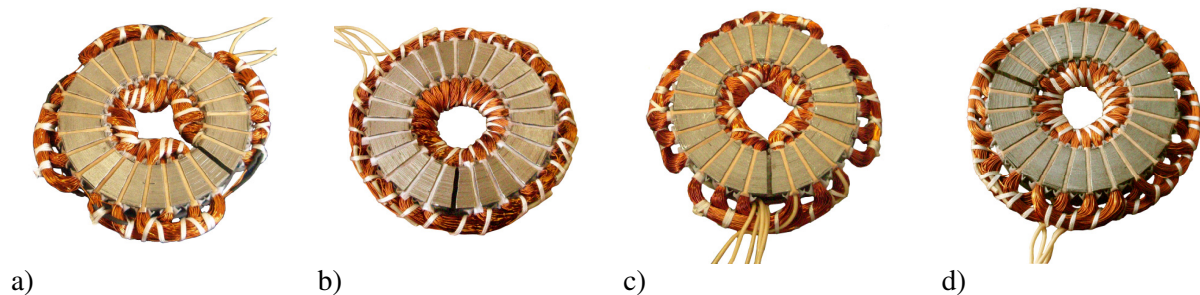
Na výpočet strát v železe sa použil vzorec (4.12) modifikovaný pre jeden element FEM modelu (Kindl, 2009). Celkové straty sa potom vypočítajú ako suma elementárnych strát.



Z výsledkov simulačných výpočtov vyplýva, že použitie extrémne tenkých izolácií s malým magnetickým odporom medzi plechmi by spôsobilo zvýšenie strát v železe o viac ako 8,4 % oproti prípadu, keď by izolácie boli hrubšie a zabránili by tak prechodu magnetických siločiar medzi plechmi navzájom (pri  $c = 0,96$ ). Pri bežne používaných koeficientoch plnenia železa  $c \in (0,8 \div 0,96)$  sú však rozdiely medzi stratami v železe spôsobené radiálnymi tokmi rádovo len v stotinách wattu a preto môžu byť zanedbané. Pokiaľ si to teda nevyžaduje iná okolnosť, tak vo FEM simuláciách diskových motorov nie je vždy potrebné uvažovať s 3D FEM analýzou len kvôli lamináciám.

## 10 Vinutia diskových motorov

Elektrické a konštrukčné parametre vinutí majú priamy vplyv na prevádzkové vlastnosti a cenu motorov. Rozptylová indukčnosť a odpor vinutia znižujú hodnotu prúdu a tým aj výkon stroja. Za účelom porovnania technických a ekonomických parametrov jednotlivých konfigurácií vinutí boli stator analyzovaného DM niekoľkokrát previnuté a zmerané. Fotografie previnutých statorov s jednotlivými vinutiami sú znázornené na Obr. 10.1.



**Obr. 10.1.** Fotografie jednotlivých typov experimentálnych vinutí  
a) 1-vrstvové slučkové, b) 2-vrstvové slučkové, c) 1-vrstvové vlnové, d) 2-vrstvové vlnové

Namerané hodnoty pre jeden stator motora sú uvedené v Tab. 10.1. Praktické experimenty ukázali, že čelá cievok sa ľahšie formujú pri 2-vrstvových vinutiach a vďaka tomu je možné urobiť ich kratšie. Z výsledkov meraní vyplýva, že z technického hľadiska sa ako najlepšie javí 2-vrstvové slučkové vinutie, zatiaľ čo z ekonomického hľadiska sú výhodné 1-vrstvové vlnové vinutia, ktoré sa dajú navinúť za najkratší čas.

**Tab. 10.1.** Porovnanie vybraných parametrov vinutí z experimentálnych meraní

	Slučkové 1-vrstvové	Slučkové 2-vrstvové	Vlnové 1-vrstvové	Vlnové 2-vrstvové
<b>Elektromagnetické parametre</b>				
Fázový odpor $R_{f20^{\circ}\text{C}}$	4,9 $\Omega$	4,7 $\Omega$	5,6 $\Omega$	5,0 $\Omega$
Fázová indukčnosť $L_f$	8,1 mH	6,7 mH	8,9 mH	7,5 mH
Združená indukčnosť $L_s$	17,3 mH	15,2 mH	18,5 mH	17,0 mH
Celková rozptylová indukčnosť fázy $L_c$	8,6 mH	7,2 mH	9,1 mH	8,0 mH
Rozptylová indukčnosť $L_\sigma$	5,4 mH	4,0 mH	5,9 mH	4,8 mH
<b>Ekonomické parametre</b>				
Spotreba medi	250 g	240 g	290 g	260 g
Čas potrebný na naviniutie	5,5 hod	8,5 hod	5 hod	5,5 hod

## 11 Záver

Práca sa zaoberá špeciálnou konštrukciou SMPM s diskovo tvarovanými rotormi. Predpokladá sa, že práve diskové motory budú vďaka svojej krátkej axiálnej dĺžke tvoriť v budúcnosti významnú súčasť elektrických trakčných pohonov a robotických aplikácií.

V úvode práce je uvedený aktuálny prehľad súčasného stavu technológie v danej oblasti. Následne je v jednotlivých kapitolách spracovaný postup návrhu DMPM. Metodika návrhu je predstavená na konkrétnom výpočte DMPM. Jadro výskumnej časti práce tvorí najmä kapitola o existencii radiálnych magnetických tokov v jarmách statorov DM, kde sa ukázalo, že použitie veľmi tenkých izolácií medzi plechmi statora môže viesť k zvýšeniu strát v železe. Kapitola venovaná konštrukčným úpravám DMPM prehľadne popisuje možnosti redukcie zvlnenia výstupného momentu motora pomocou vhodne zvoleného tvaru magnetického obvodu stroja. Významný príspevok pre priemyselnú prax predstavuje najmä kapitola o vinutiach používaných v diskových motoroch, v ktorej boli teoreticky aj experimentálne analyzované technické a ekonomické parametre jednotlivých typov vinutí.

Vedecko-výskumné výsledky získané v rámci vypracovávania téz tejto práce posúvajú hranice poznania v oblasti konštrukcie elektrických strojov a predstavujú komplexný príspevok k problematike stavby a optimalizácie vlastností DMPM.

## Vedecký a praktický prínos práce

Hlavný prínos práce spočíva v komplexnom spracovaní a výskume problematiky konštrukcie diskových motorov budených permanentnými magnetmi. V práci je predstavená veľmi efektívna možnosť simulovania reluktančných sietí pomocou využitia toolboxu pre simuláciu elektrických obvodov v programe Matlab/Simulink. Pre výpočet pracovných charakteristík stroja bola vypracovaná metóda zohľadňujúca celé harmonické spektrum napájacieho zdroja. Taktiež bola vypracovaná unikátna štúdia o existencii radiálnych magnetických tokov v jarme diskových motorov a o ich vplyve na straty v železe statora. V práci je uvedený ucelený návod pre návrh diskového motora. Bol vypracovaný kompletný postup meraní pre identifikáciu parametrov diskového motora. Za účelom vyhladenia momentu motora boli teoreticky aj prakticky porovnané špecifické konštrukčné asymetrie, ktoré je možné využiť obzvlášť v diskových motoroch. Výstupom z experimentálnej a teoretickej analýzy elektrických a ekonomických parametrov rôznych typov vinutí sú praktické odporúčania pre konštruktérov a opravárov elektrických strojov.

## Summary

*The thesis deals mainly with optimization of electrical properties of electric motors with disc-type permanent magnet rotors. There is summarized the current state of art regarding disc type motors, their construction and practical applications. There are also analyzed the materials of permanent magnets suitable for use as excitation in these motors.*

*The main part of the thesis is dedicated to the design of disc type motors, with emphasis placed on constructional specifics of these motors. For analyzing of magnetic circuits mainly finite element method and reluctance networks were used. The design was performed as reverse calculation of existing disc motor prototype. The accuracy of design calculations were verified by measuring of parameters and load characteristics of real machine.*

*The core of research work consists of analyses of drive system with frequency converter, optimization of magnetic circuit in order to dump the torque pulsations, thermal analysis and analysis of radial magnetic fluxes in the stator yoke. There is also presented the practical evaluation of various winding types suitable for toroidal stators. The final part of thesis is devoted to the analysis of possibility of building the cage winding on the disc rotor.*



## Zoznam použitej literatúry

- [1] **Almássy, S., et al. (1992).** *Elektrické akčné členy*. Bratislava: STU. ISBN 80-227-0478-4.
- [2] **Aydin, M., Huang, S. a Lipo, T. (2002).** A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control. *IEEE IAS Annual Meeting*. Oct 11-19, 2002, Vol. 2, pp. 1250-1257.
- [3] **Aydin, M.; Huang, S.; Lipo, T. (2001).** Design and 3D Electromagnetic Field Analysis of Non-slotted and Slotted TORUS Type Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Machines. *International Electrical Machine and Drive Conference*.
- [4] **Azzouzi, J.; Barakat, G.; Dakyo, B. (2005).** Quasi-3-D Analytical Modeling of the Magnetic Field of an Axial Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*. Vol. 20, 4.
- [5] **Bršlica, V. a Hrabovcová, V. (1996).** Disc Synchronous Motor Temperature Monitoring by R-C Net Thermal Model. *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 47, 7-8, pp. 202-208.
- [6] **Caricchi, F.; Crescimbin, F.; Honorati, O. (1998).** Low-Cost Compact Permanent Magnet Machine for Adjustable-Speed Pump Application. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. Vol. 34, 1.
- [7] **Caricchi, F.; Crescimbin, F.; Honorati, O. (1999).** Modular Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for Ship Propulsion Drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 14.
- [8] **Caricchi, F.; Crescimbin, F.; Mezzeti, F.; Santini, E. (1996).** Multistage Axial-Flux PM Machine for Wheel Direct Drive. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. Vol. 32, 4.
- [9] **Caricchi, F.; Crescimbin, F.; Santini, E. (1994).** Basic Principle and Design Criteria of Axial-Flux PM Machines Having Counter-Rotating Rotors. *Industry Applications Society Annual Meeting - Conference Record of the 1994 IEEE*. Oct 2-6, 1994.
- [10] **Cavagnino, A.; Lazzari, M.; F., Profumo; A., Tenconi. (2000).** Axial Flux Interior PM Synchronous Motor: Parameter Identification and Steady-State Performance Measurements. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. Vol. 36, 6, pp. 1581 - 1588.
- [11] **Cavagnino, A.; Lazzari, M.; Profumo, F.; Tenconi, A. (2002).** A Comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM Synchronous Motors. *IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATION*. Vol. 38, 6, pp. 1517-1524.
- [12] **Cigánek, L. (1950).** *Elektrické stroje*. Bratislava: Vědecko-technické nakladatelství.
- [13] **Cigánek, L. (1958).** *Stavba elektrických strojov*. Praha: Štátné nakladateľstvo technickej literatúry.
- [14] **Copper Plus s.r.o. (2010).** Medené smaltované drôty. [Online] 2010. [Citované: Dec 30, 2010.] <http://www.copperplus.sk/charakteristika.phtml?id3=39575>.
- [15] **Cvetkovski, G.; Petkovska, L.; Gair, S. (2006).** TORQUE ANALYSIS OF AXIAL FIELD PM SYNCHRONOUS MOTOR FOR EV. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM*.
- [16] **Deshpande, U.S. (2003).** Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines – a Review. *Proceedings of IEEE Electric Machines and Drives Conference IEMDC'03*. June 1-4, 2003, Vol. 1, pp. 509-515.
- [17] **Evans, P.D. a Eastham, J.F. (1978).** Segmented-rotor disc motor. *Electric Power Applications*. Feb 1978, Vol. 1, 1.
- [18] **Ficheux, R.L.; Caricchi, F.; Crescimbin, F.; Honorati, O. (2001).** Axial-Flux Permanent-Magnet Motor For Direct-Drive Elevator System Without Machine Room. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. Nov/Dec, 2001, Vol. 37, 6.
- [19] **Franko, M. (2009).** *Synchrónny motor s permanentými magnetmi v trakčnej aplikácii - dizertačná práca*. Žilina: EF KVES.
- [20] **Furlani, E.P.; Knewton, M.A. (1997).** A Three-Dimensional Field Solution for Permanent-Magnet Axial-Field Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*. Vol. 33, 3.
- [21] **G., Charanjiv, M., Sanjay a Manpreet, S. M. (2009).** FINITE ELEMENT METHOD AS AN AID TO MACHINE DESIGN: A COMPUTATIONAL TOOL. *Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Bangalore*.

- [22] **Gieras, F. a Wing, M. (1998).** *Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications.* New York : Marcel Dekker Inc. ISBN 0-8247-9794-9.
- [23] **Gieras, J.F., R.J., Wang, a M.J., Kamper. (2004).** *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines.* Dordrecht : Springer Science. ISBN 1-4020-2661-7.
- [24] **Grumbrecht, P. a Shehata, M.A. (1990).** Comparative Study on Different High Power Variable Speed Drives with Permanent Magnet Synchronous Motors. *Electric Drives Symposium EDS'90.* 1990.
- [25] **Hanselman, D.C. (1994).** *Brushless Permanent-Magnet Motor Design.* New York: McGraw-Hill, Inc.
- [26] **Hitachi Metals Ltd. (2004).** Product Catalogue: Neomax Demagnetization curve. [http://www.hitachi-metals.co.jp/e/prod/prod03/pdf/nmx\\_a.pdf](http://www.hitachi-metals.co.jp/e/prod/prod03/pdf/nmx_a.pdf). [Online] 2004. [Citované: Jún 23, 2010.]
- [27] **Hrabovcová, V.; Janoušek, L.; Rafajdus, P.; Ličko, M. (2001).** *Moderné elektrické stroje.* Žilina : EDIS Žilinská univerzita. ISBN 80-7100-809-5.
- [28] **Hrabovcová, V.; Rafajdus, P. (2009).** *Elektrické stroje - Teória a príklady.* Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU. ISBN 978-80-554-0101-0.
- [29] **Hrabovcová, V.; Rafajdus, P.; Franko, M.; Hudák, P. (2004).** *Meranie a modelovanie elektrických strojov.* Žilina : EDIS vydavateľstvo ŽU.
- [30] **Hruškovič, L. (2004).** *Elektrické stroje.* Bratislava: Vydavateľstvo STU. ISBN 80-227-2139-5.
- [31] **Hsu, J.S. (2001).** Flux Guides for Permanent Magnet Machines. *IEEE transactions on energy conversion.* Jún 2001, Vol. 16, 2.
- [32] **Chaieb, M.; Tounsi, S.; Neji, R. (2009).** Design optimization of axial permanent magnet machine for electric vehicle. *J. Electrical Systems.* Vol. 5, 1.
- [33] **Chiver, O., et al. (2010).** Study regarding end winding inductance of three phase A.C. winding in a single layer. *Proceedings of the International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT TECHNOLOGIES and EQUIPMENT.*
- [34] **Chung, M-J.; Gweon, D-G. (2002).** Modelling of the armature slotting effect of magnetic field distribution of a linear permanent magnet motor. *Proc. Electrical Engineering.* Vol. 84.
- [35] **Isfahani, A.H.; Vaez-Zadeh, S. (2009).** Line start permanent magnet synchronous motors : Challenges and opportunities. *Energy.* Vol. 34, pp. 1755-1763.
- [36] **Kindl, V. (2009).** Calculation of iron losses in induction machine using FEM. *International Symposium On Electric Machinery In Prague ISEM 2009.*
- [37] **Klug, L. a Duč-Anci, M. (2008).** Magnetic Field of the armature winding of permanent magnet synchronous motors with concentrated coils on the stator. *International Symposium On Electric Machinery In Prague ISEM 2008.* Sep 10-11.
- [38] **Klug, L. (1996).** Axial field permanent magnet synchronous machines. *Proceedings of International Symposium on Micromachines and Servodrives MIS '96.* Vol. 1.
- [39] **Klug, L. (1989).** *Príspevok k navrhovaniu striedavých servomotorov s diskovým rotorom.* Bratislava: Elektrotechnická fakulta SVŠT.
- [40] **Klug, L., Guba, R. (1992).** Disc-rotor AC servomotor drive. *Zborník konferencie EDPE.*
- [41] **Klug, L., Guba, R., Žalman, M. (1992).** Axial Field Synchronous Servomotor Drive. *Proceedings of PCIM '92 in Nürnberg.*
- [42] **Knotek, J. a Knotek, J. (1990).** *Navíjení a převíjení malých elektrických strojů točivých.* Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury. ISBN 80-03-00323-7.
- [43] **Kopylov, I.P., Sergejev, P.S. a Vinogradov, N.V. (1980).** *Stavba elektrických strojů.* Moskva: SNTL/Mir.
- [44] **Kotlárík B., Vaňková R. (2010).** Smery vývoja impregnačných prostriedkov. *DIELEKTRICKÉ A IZOLAČNÉ SYSTÉMY V ELEKTROTECHNIKE A ENERGETIKE - DISEE 2010.* 2010.
- [45] **Kreidl, M., Šmíd, R. (2006).** *Technická diagnostika - Senzory, metódy, analýza signálu.* Praha: BEN Technická literatúra.
- [46] **Kuchta, J. (2008).** *Niektoré otázky návrhu asynchrónneho trakčného motora pre rušne s elektrickým prenosom výkonu.* Žilina: ŽU. ISBN 978-80-8070-8412.

- [47] **Kurronen, P. (2003).** *TORQUE VIBRATION MODEL OF AXIAL-FLUX SURFACE MOUNTED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE - Doctoral thesis.* Lappeenranta University of Technology : Digipaino. ISBN 951-764-773-5.
- [48] **Kurronen, P.; Pyrhönen, J. (2007).** Analytic calculation of axial-flux permanent magnet motor torque. *IET Electric Power Applications.* Vol. 1, 1.
- [49] **Lamperth, M.U.; Beudet, A.; Jaensch, M. (2008).** DISC MOTORS FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS. *Hybrid & Eco Friendly Vehicles Conference 2008 (HEVC 2008) Proceedings.* Dec 8-9, 2008.
- [50] **Libert, F.; Soulard, J.; Engström, J. (2010).** Design of a 4-pole Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics.* Vol. 46, 12, pp. 4066-4072.
- [51] **Lukaniszyn, M.; Wróbel, R.; Mendrela, E.; Janta, T. (2000).** WPŁYW STRUKTURY RDZENIA STOJANA NA MOMENT SILNIKA TARCZOWEGO TYPU TORUS Z MAGNESAMI TRWAŁYMI. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej.* Vol. 48, 20.
- [52] **Magnet Sales, Product Overview. (2000).** Quick Comparison Chart. <http://www.magnetsales.com/Otherprod/Materials.htm#chart>. [Online] 2000. [Citované: Jún 23, 2010.]
- [53] **Magureanu, R.; Vasile, N. (1990).** *Servomotoare fara perii tip sincron.* Bukurešť : Editura Tehnica. ISBN 973-31-0162-1.
- [54] **Mardaneh, M., Mirsalim, M. a Aliahmadi, M. (2006).** Modeling and Design of Axial-Flux Permanent Magnet Machines: A New Approach. *The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2006).*
- [55] **Matsch, L.W. (1972).** *Electromagnetic and Electromechanical Machines.* Scranton, Pennsylvania: The Haddon Craftsmen Inc. ISBN 0-7002-2406-8.
- [56] **Meeker, D. (2009).** *Finite Element Method Magnetics.* Version 4.2 User's Manual.
- [57] **Mendrela, E.A. a Drzewoski, R. (2000).** Performance of stator salient pole disc brushless DC motor for EV. *Power Electronics and Variable Speed Drives.* Conference Publication IEE, No. 475.
- [58] **Mentlík, V. a kol. (1995).** *Elektrotechnické materiály.* Plzeň: ZČU.
- [59] **Miller, T.J.E. (1989).** *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives.* Oxford: Clarendon Press. ISBN 0-19-859369-4.
- [60] **Millner, A.R. (1994).** Multi-Hundred Horsepower Permanent Magnet Brushless Disc Motors. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '94. Conference Proceedings.*
- [61] **Ondruška, E. a Maloušek, A. (1985).** *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých.* Praha: SNTL.
- [62] **Ong, Ch.M. (1998).** *Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink.* New Jersey: Prentice Hall PTR.
- [63] **Oxford YASA Motors. (2011).** Oxford YASA Motors. [Online] 2011. [Citované: 4 13, 2011.] <http://www.yasamotors.com>.
- [64] **Parker SSD Parvex. (2010).** Axem Servo-Motors Product Catalogue. [http://www.parvex.com/english/products/axem-servo\\_motors.htm](http://www.parvex.com/english/products/axem-servo_motors.htm). [Online] 2010. [Citované: Júl 7, 2010.]
- [65] **Parker, R.J. (1990).** *Advances in Permanent Magnetism.* New York: John Wiley&Sons.
- [66] **Parviainen, A. (2005).** *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machines.* Lappeenrantaensis: Digipaino. ISBN 952-214-029-5.
- [67] **Patterson, D., Spée, R. (1995).** The Design and Development of an Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Wheel Drive in a Solar Powered Vehicle. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS.* Vol. 31, 5.
- [68] **Peeters, E., Tichelen, P.V. (2004).** Comparison of different 600 kW designs of a new permanent generator for wind power applications. *European Wind Energy Conference & Exhibition Proceedings.* Nov 22-25, 2004.
- [69] **Polinder, H., Hoeijmakers, M.J. (1997).** Eddy-current losses in the permanent magnets of a PM machine. *EMD'97 IEE Conference Publication.* Sep 1-3, 1997.

- [70] **Qu, R., Lipo, T.A. (2002).** Analysis and Modeling of Airgap & Zigzag Leakage Fluxes in a Surface Mounted-PM Machine. *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record.* Vol. 4.
- [71] **Rahman, M.F., Yoo, K. a Lim, K.W. (1995).** Performance Of An Axial-Flux PM Disc Motor Under Impressed Current Waveforms. *IEEE Catalogue.* No. 95TH8025.
- [72] **Vacon s.r.o. (2006).** Príručka používateľa frekvenčného meniča VACON NXL. s.l.: Vacon Oyj.
- [73] **Sabo, G. (1999).** Analýza strát trakčného indukčného motora s využitím výsledkov analýzy magnetického poľa metódou konečných prvkov. Diplomová práca. Bratislava: FEI STU.
- [74] **Sahin, F. (2001).** DESIGN AND DEVELOPMENT OF A HIGH-SPEED AXIAL-FLUX PERMANENT-MAGNET MACHINE. s.l.: Technical University Eindhoven.
- [75] **Salminen, P. (2004).** FRACTIONAL SLOT PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FOR LOW SPEED APPLICATIONS. Lappeenranta University of Technology: Digipaino.
- [76] **SAS IP, Inc. (2009).** Ansys Tutorials - Product documentation.
- [77] **Schenck RoTec GmbH. (2011).** Prečo vyvažovať. [Online] 2011. [Citované: 3 1, 2011.] [http://www.schenck-rotec.sk/why-balancing\\_/index.php](http://www.schenck-rotec.sk/why-balancing_/index.php).
- [78] **Song, W., Tseng, K.J., Chan, W.K. (2010).** Design of bearingless BLDC motor. [http://www.cs.uq.edu.au/~aupec/aupec01/145\\_SONG\\_AUPEC01paper%20revised.pdf](http://www.cs.uq.edu.au/~aupec/aupec01/145_SONG_AUPEC01paper%20revised.pdf). [Online] 2010.
- [79] **Studer, C., Keyhani, A., Sebastian, T., Murthy, S.K. (1997).** Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines. *IEEE IAS Annual Meeting.*
- [80] **Wiak, S., Welfle, H., Komez, K., Mendrel, E. (1998).** Electromagnetic Field Analysis of 3D Structure of Disk-Type Motors. *International XI Symposium on Micromachines and Servodrives.* Sep 1998, Vol. 1, pp. 44-51, 14-18.
- [81] **Woolmer, T.J., McCulloch, M.D. (2007).** Analysis of the Yokeless And Segmented Armature Machine. *Electric Machines & Drives Conference IEMDC '07. IEEE International.*
- [82] **Zhang, C., Tseng, K.J., Zhou, J. (2003).** Modeling and Simulation of a Disk-type Permanent Magnet Bearingless motor. *Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003.* Nov 2003, Vol. 2, pp. 1630-1635.
- [83] **Zhu, Z. Q. and Howe, D. (1992).** Analytical Prediction of the Cogging Torque in Radial-Field Permanent Magnet Brushless Motors. *IEEE Transaction on Magnetics.* Vol. 28.

## Publikácie autora

- [1] **Duč-Anci, M. a Uhrík, M., (2010a).** Simulation Analysis of Selected Transient Phenomena in a Generator. *Power Engineering 2010. Control of Power Systems: 9th International Scientific Conference CPS. Tatranské Matliare, SR, 18.-20.5. 2010.* Bratislava: STU Bratislava, s. 4. ISBN 978-80-89402-25-0.
- [2] **Duč-Anci, M. a Uhrík, M., (2010b).** Prechodné javy na synchronných generátoroch. *EE Časopis pre elektrotechniku a energetiku.* Aug 2010. Vol. 16, No.4, pp. 38-40.
- [3] **Duč-Anci, M. a Uhrík, M., (2010c).** Simulatory assessment of synchronous generator stability. *International Symposium On Electric Machinery In Prague ISEM 2010.* 8-9 Sep 2010.
- [4] **Duč-Anci, M. a Uhrík, M., (2010d).** Posúdenie stability synchronného generátora simuláciou. *EE Časopis pre elektrotechniku a energetiku.* Okt 2010. Vol. 16, No.5, pp. 34-36.
- [5] **Duč-Anci, M. a Uhrík, M., (2010e).** Obvody striedačov frekvenčných meničov. *EE Časopis pre elektrotechniku a energetiku.* Dec 2010. Vol. 16, No.6, pp. 35-37.
- [6] **Duč-Anci, M. a Uhrík, M., (2011).** Analýza harmonického spektra výstupného napätia v jednofázovom mostíkovom napäťovom striedači v programe Matlab. *Sborník XXXII. Konference o elektrických pohonech v Plzni. Plzeň.*
- [7] **Lazorík, S. a Uhrík, M., (2012).** Analýza príčin vzniku ložiskových prúdov v asynchronných strojoch a ich detekcia. *Zborník ŠVOČ – sekcia Elektrotechnika.* Bratislava: FEI STU, 2012.
- [8] **Šály, V., Packa, J., Uhrík, M., (2011).** Skúšky materiálov fotovoltaických modulov. *Energetika.* Jan 2011. Vol. 61, No.1, pp. 40-43.

- [9] **Uhrík, M., (2007).** Trace transformácia. *Zborník ŠVOČ – sekcia Meracia technika*. Bratislava: FEI STU, 2007.
- [10] **Uhrík, M., (2009).** *Riadenie pohybu hlavice robota v priestore*. Diplomová práca. Bratislava: FEI STU, 2009. 58 s.
- [11] **Uhrík, M., (2010a).** The Possibility of Utilization of Permanent Magnets in the Sources of Wind Power Plants. *Power Engineering 2010. Energy, Ecology, Economy: 9th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia, 18.-20.5. 2010*. Bratislava: STU Bratislava, ISBN 978-80-89402-23-6.
- [12] **Uhrík, M., (2010b).** Detection of Faulty Rotor Bars in Cage Induction Motors. *Proceedings of ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010*. Bratislava: STU Bratislava, ISBN 978-80-227-3303-8.
- [13] **Uhrík, M., (2010c).** Vinutia diskových motorov. *EE Časopis pre elektrotechniku a energetiku*. Dec 2010. Vol. 16, No.6, pp. 10-11.
- [14] **Uhrík, M., (2011a).** Radial magnetic fluxes in disc-type motors. *Proceedings of ELITECH'11: 13th Conference of Doctoral Students*. Bratislava.
- [15] **Uhrík, M., (2011b).** Vplyv neharmonického napájania na prevádzkové charakteristiky a straty diskových motorov s permanentnými magnetmi. *Sborník XXXII. Konference o elektrických pohonech v Plzni*. Plzeň. Máj 2011.
- [16] **Uhrík, M., (2011c).** Reduction of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent Magnet Machines. *International Symposium On Electric Machinery In Prague ISEM 2011*. 7-9 Sep 2011.
- [17] **Uhrík, M., (2011d).** The possibilities of vibrodiagnostic analysis in electrical machinery. *Proceedings of International conference Elosys – Electrotechnics, Informatics and Telecommunications*. Trenčín. 11-14 Okt 2011.
- [18] **Uhrík, M., (2012a).** Detection of bearing currents in induction machines. *Proceedings of ELITECH'12: 14th Conference of Doctoral Students*. Bratislava.
- [19] **Uhrík, M., (2012b).** Optimization of electrical parameters of windings used in axial flux electrical machines. *Power Engineering 2012. Energy, Ecology, Economy: 11th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia, 15.-17.5. 2012*. Bratislava: STU Bratislava, ISBN 978-80-89402-50-2.
- [20] **Uhrík, M., (2012c).** Leakage Inductance of Windings used in Electrical Machines with Disc-Type Rotor. *Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE)*. Rumunsko. Máj 2012. Vol. 5, No. 1. V tlači.
- [21] **Uhrík, M., (2012d).** Optimization of electrical and economical parameters of windings used in axial-flux machines. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*. Neapol: Praiseworthyprize. Taliansko. Aug 2012. V tlači.
- [22] **Uhrík, M. a Duč-Anci, M., (2010a).** The Identification of Selected Parameters of Synchronous Machine Using the Simulation. *Power Engineering 2010. Control of Power Systems: 9th International Scientific Conference CPS. Tatranské Matliare, SR, 18.-20.5. 2010*. Bratislava: STU Bratislava, s. 5. ISBN 978-80-89402-25-0.
- [23] **Uhrík, M. a Duč-Anci, M., (2010b).** Zisťovanie defektov v rotoroch asynchrónnych motorov. *VOLT - EE Časopis pre elektrotechniku a energetiku*. Aug 2010. Vol. 2, No.4, pp. 2-4.
- [24] **Uhrík, M. a Duč-Anci, M., (2010c).** Detection of damaged rotor bars and their influence on performance characteristics of induction motor. *International Symposium On Electric Machinery In Prague ISEM 2010*. 8-9 Sep 2010.
- [25] **Uhrík, M. a Duč-Anci, M., (2011a).** Bezkefové trendy v moderných elektrických strojoch. *VOLT - EE Časopis pre elektrotechniku a energetiku*. Feb 2011. Vol. 3, No.1, pp. 6-9.
- [26] **Uhrík, M., Hüttner, E., Duč-Anci, M., (2011).** Upper Harmonics in Output Voltage of Inverters. *International Symposium On Electric Machinery In Prague ISEM 2011*. 7-9 Sep 2011.
- [27] **Uhrík, M. a Šály, V., (2010).** Vplyv laminovania statora na straty diskových generátorov v zdrojoch veterných elektrární. *Energetika*. Nov 2010. Vol. 60, No.11, pp. 650-652.