

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Ján Chudiváni

Autoreferát dizertačnej práce

MOTORY S PERMANENTNÝMI MAGNETMI NA ROTORE

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

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

Miesto a dátum: Bratislava, 12. 06. 2014

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

Predkladateľ: **Ing. Ján Chudiváni**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Ľudovít Hüttner, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **doc. Ing. Pavol Rafajdus, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra výkonových elektrotechnických systémov
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

doc. Ing. Michal Kostelný, CSc.
Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Letná 9, 042 00 Košice

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod. na Ústave
elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky FEI STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU V Bratislave

Obsah

Tézy dizertačnej práce	4
Úvod	4
1 Súčasný stav problematiky	4
2 Metodika elektromagnetického návrhu bezkefového motora s koncentrickým vinutím	5
2.1 Prepočet BSM s koncentrickým vinutím	6
3 Elektromagnetická analýza bezkefového motora s koncentrickým vinutím	8
3.1 Skúmanie magnetických polí v zaťaženom stave	8
4 Experimentálne merania na bezkefovom motore s koncentrickým vinutím	10
4.1 Experimentálne meranie proprietárneho meniča frekvencie	10
4.2 Experimentálne meranie BSM s koncentrickým vinutím	11
5 Simulačná schéma bezkefového motora s koncentrickým vinutím	11
5.1 Matematický model BSM s koncentrickým vinutím	11
5.2 Simulačná schéma BSM s koncentrickým vinutím	12
6 Odporúčania pre celkový návrh bezkefového motora s koncentrickým vinutím	13
Záver	14
Prínosy dizertačnej práce	15
Summary	15
Zoznam bibliografických odkazov	16
Zoznam publikácií autora	19

Tézy dizertačnej práce

Dizertačná práca sa zaoberá problematikou metodiky elektromagnetického návrhu bezkefového motora s koncentrickým vinutím na statore a s povrchovými permanentnými magnetmi na rotore (BMKV). Na základe analýzy súčasného stavu BMKV a aktuálnych požiadaviek priemyselného odvetvia boli stanovené nasledujúce tézy dizertačnej práce:

1. Spracovanie metodiky elektromagnetického návrhu bezkefového motora s koncentrickým vinutím.
2. Spracovanie elektromagnetickej analýzy bezkefového motora s koncentrickým vinutím pomocou metódy konečných prvkov.
3. Vykonanie experimentálneho merania na bezkefovom motore s koncentrickým vinutím.
4. Vytvorenie simulačnej schémy bezkefového motora s koncentrickým vinutím v prostredí programu Matlab-Simulink, pomocou ktorej sa budú dať simulovať prevádzkové vlastnosti.
5. Na základe získaných výsledkov z bodov 1. až 4. vypracovať odporúčania pre prax.

Úvod

Moderné elektrické motory patria do skupiny elektrických zariadení, ktorou sa zaoberajú vedci, výskumníci a inžinieri celého sveta, pričom sa snažia dosiahnuť zvýšenie účinnosti, zvýšenie výkonu a hlavne zníženie spotreby elektrickej energie elektrických motorov. Rozvojom výkonovej elektroniky a materiálov permanentných magnetov (PM) sú v súčasnosti elektrické motory s klasickým elektromagnetickým budiacim vinutím nahrádzané elektrickými motormi, ktoré využívajú na budenie PM. Preto je dôležité skúmať vlastnosti, správanie a základné veličiny PM, ako je remanentný magnetizmus (remanencia) B_r [T], koercitívna sila (koercitivita) H_c [kA/m], maximálny energetický súčin magnetu $(BH)_{max}$ [kJ/m³] a pod.

Základom dizertačnej práce je metodika postupu elektromagnetického návrhu bezkefového motora s koncentrickým vinutím na statore a s povrchovými PM na rotore (BMKV). Ďalšími dôležitými bodmi v dizertačnej práci, ktoré slúžia pre verifikovanie a stanovenie prevádzkových vlastností BMKV, je elektromagnetická analýza pomocou metódy konečných prvkov (MKP), experimentálne merania BMKV a simulácie BMKV v prostredí programu Matlab-Simulink. V závere dizertačnej práce sú spracované odporúčania pre prax z hľadiska celkového návrhu BMKV (nielen elektromagnetického návrhu).

1 Súčasný stav problematiky

Cieľom konštruktérov točivých elektrických strojov je zlepšiť prevádzkové vlastnosti, zvýšiť účinnosť a znížiť straty točivých elektrických strojov. Ďalej sa konštruktéri zameriavajú na znižovanie rozmerov, na zníženie hmotnosti, na zníženie spotreby elektrickej energie a v konečnom dôsledku aj na koncovú cenu točivých elektrických strojov. Samozrejme musia zohľadniť aj elektrické a magnetické využitie použitých materiálov v elektrickom stroji. Výskumom v oblasti elektrických strojov a v oblasti polovodičových ventilov sa dospelo k veľmi dobrej spolupráci medzi týmito dvomi veľkými oblasťami elektrotechniky. Táto spolupráca viedla k vytvoreniu nových typov točivých elektrických strojov, ktoré používajú na budenie PM. PM nahrádzajú klasické budenie jednosmerným prúdom v budiacom vinutí (nevznikajú straty v budiacom vinutí, zlepšenie účinnosti elektrického stroja). Stator stroja s PM má trojfázové rozložené alebo koncentrické vinutie a rotor obsahuje PM, ktoré môžu byť umiestnené na povrchu rotora, vo vnútri rotora, zapustené do rotora a pod.

Výber vhodného materiálu PM je dôležitý z hľadiska kompromisu medzi kvalitným PM a jeho cenou. Preto je vhodné už počas návrhu elektrického stroja sa zaoberať nasledovnými otázkami: na aký účel bude používaný, za akých prevádzkových podmienok bude pracovať (vnútorné alebo vonkajšie prostredie), aký dlhý čas bude v zaťaženom stave (prerušovaná alebo neprerušovaná prevádzka) a pod.

V súčasnosti sa používajú tri druhy materiálov PM v elektrických strojoch, ktorých fyzikálne vlastnosti sú uvedené v Tab. 1:

- *materiály PM na báze zliatin,*

- feritové (keramické) materiály PM,
- materiály PM zo vzácných zemín [Hrabovcová et al., 2001a].

Tab. 1 Fyzikálne vlastnosti materiálov PM [Sekerák et al., 2012]

Materiály PM	Veličina PM			
	B_r [T]	H_c [kA/m]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	T_{max} [°C]
Alnico materiály	0,6 – 1,16	40 – 120	10 – 35	520
Feritové (keramické) materiály	0,2 – 0,48	120 – 360	7 – 42	400
Materiály zo vzácných zemín	NdFeB	0,97 – 1,45	740 – 1000	200 – 500
	SmCo	0,85 – 1,1	620 – 840	120 – 240

V teórii a v praxi elektrických strojov sú dostatočne známe výhody, nevýhody a vlastnosti jednosmerných motorov. Dostatočne známe sú ich nevýhody, súvisiace s komutátorom a kefami. V niektorých aplikáciách je opotrebovanie kef závažným problémom, ktorý sa dá vyriešiť len odstránením kef. Táto úvaha bola základom pre vývoj a následnú konštrukciu nového typu motorov s tzv. *elektronickou komutáciou*, v ktorých je klasické budenie nahradené PM a ktoré sa nazývajú *bezkefové motory (BM)*. BM môžeme rozdeliť na:

- *bezkefový jednosmerný motor (BJM)*,
- *bezkefový synchronný motor (BSM)* [Hrabovcová et al., 2001c].

Kombináciou BJM a BSM dostaneme *univerzálny bezkefový motor (UBM)* [Gieras et al., 1997b], pričom je dôležité spomenúť aj klasický *synchronný stroj (SS) s PM*.

2 Metodika elektromagnetického návrhu bezkefového motora s koncentrickým vinutím

Cieľom elektromagnetického návrhu BM s koncentrickým vinutím je stanoviť hlavné rozmery stroja (vnútorný priemer statora – vrtanie a ideálna dĺžka statora), rozmery statora a statorové veličiny, veľkosť vzduchovej medzery medzi statorom a rotorom, rozmery rotora a rotorové veličiny, optimálny materiál a rozmery PM, objem PM (ovplyvňuje čo najlepšie využitie PM), veľkosť statorového odporu, magnetizačnú reaktanciu, rozptylovú reaktanciu, synchronnú reaktanciu v pozdĺžnom a priečnom smere, celkové straty a pracovné charakteristiky. Treba si uvedomiť, že vypočítaním uvedených parametrov nie je elektromagnetický návrh ukončený, pretože vypočítané parametre nebudú ideálne. Preto je potrebné vykonať aproximáciu výsledkov, napr. upravenie hlavných rozmerov stroja, upravenie rozmerov PM a pod., a vykonať nový výpočet. Postupným upravením potrebných rozmerov a veličín by sme mali dostať optimálny elektromagnetický návrh BM s koncentrickým vinutím.

Elektromagnetický návrh BM s koncentrickým vinutím možno rozdeliť do nasledovných častí:

- výpočet hlavných rozmerov,
- výpočet rozmerov statora,
- výpočet rozmerov rotora a PM,
- návrh magnetického obvodu,
 - výpočet magnetických veličín vzduchovej medzery,
 - výpočet magnetického napätia zubov statora,
 - výpočet magnetického napätia jarma statora,
 - výpočet magnetického napätia jarma rotora.
- výpočet počtu závitov statora,
- výpočet odporu statorového vinutia,
- výpočet reaktancií,
- výpočet strát,
- výpočet pracovných charakteristík.

2.1 Prepočet BSM s koncentrickým vinutím

Prototypom BSM s koncentrickým vinutím je trojfázový stroj, ktorý som mal k dispozícii od spoločnosti BSH Drives and Pumps s. r. o. Factory Michalovce. Stator sa skladá zo statorových plechov a z dvanástich statorových zubov, okolo ktorých sú navinuté koncentrické cievky (Obr. 1a). Keďže počet pólov je $2p = 8$, tak na rotore je osem PM typu Strontium Ferrite SR4B. Tieto PM sa nachádzajú na povrchu rotora, na ktorých je umiestnený plech z nemagnetickej ocele (Obr. 1b).



Obr. 1 Prototyp BSM s koncentrickým vinutím

Prototyp BSM s koncentrickým vinutím som manuálne rozobral a zmeral som všetky rozmery, ktoré sa dali zmerať (Tab. 1). Dôležitou súčasťou elektromagnetického návrhu je stanoviť si parametre, ktoré by mal BSM s koncentrickým vinutím mať (Tab. 2).

Tab. 1 Namerané rozmery prototypu BSM s koncentrickým vinutím

Stator		Rotor	
$N_s = 12$	počet statorových zubov	$D_r = 64$ mm	vonkajší priemer rotora
$D_{is} = 65$ mm	vnútorný priemer statora (vrtanie)	$l_r = 35$ mm	dĺžka rotora
$l_i = 35$ mm	ideálna dĺžka statora	$d_h = 15$ mm	priemer hriadeľa
$D_{es} = 95,65$ mm	vonkajší priemer statora	$l_m = 35$ mm	aktívna dĺžka motora
$l_s = 35$ mm	dĺžka statora	$h_{jr} = 18,9$ mm	výška jarma rotora
$d_v = 0,67$ mm	priemer statorových vodičov	$\delta = 1$ mm	veľkosť vzduchovej medzery
$h_{splech} = 0,5$ mm	výška statorového plechu	$h_{rplech} = 0,5$ mm	výška rotorového plechu
$h_{js} = 7,4$ mm	výška jarma statora	$h_{plech} = 0,45$ mm	výška plechu na PM
$w_s = 105$	počet závitov na pól zub (údaj od výrobcu)	$l_{plech} = 43$ mm	dĺžka plechu na PM
PM			
$h_{PM} = 5$ mm	výška PM		
$l_{PM} = 40$ mm	dĺžka PM		
$b_{PM} = 19$ mm	šírka PM		
$l_{iis} = 2$ mm	vnútorná vzdialenosť medzi koncami dvoch PM		

Tab. 2 Zadané parametre prototypu BSM s koncentrickým vinutím

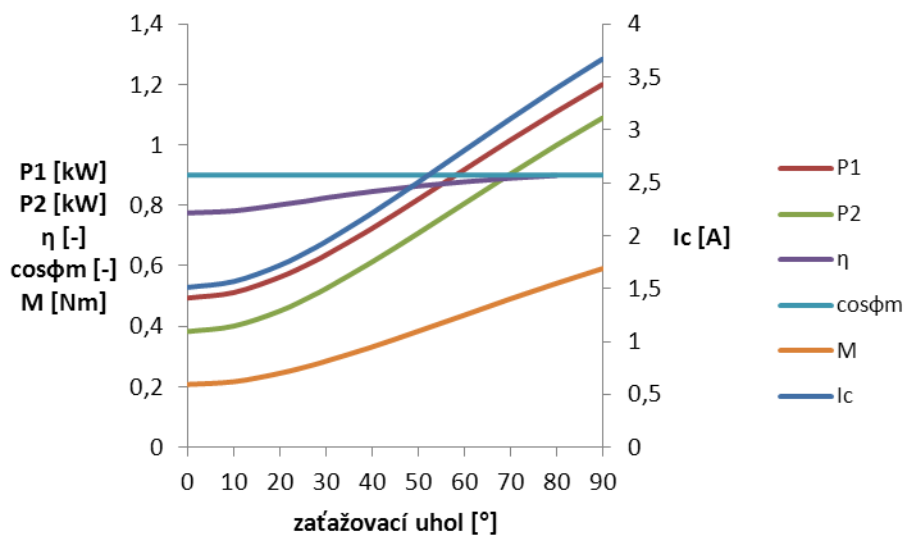
Parameter	Názov parametru	Parameter	Názov parametru
$m = 3$	počet fáz	$f = 1173$ Hz	nominálna frekvencia
$2p = 8$	počet pólov	$\eta = 69$ %	nominálna účinnosť
$U_N = 210$ V	nominálne napätie	$\cos\varphi_m = 0,75$	nominálny účinník
$P_N = 545$ W	nominálny výkon	Y	zapojenie statorového vinutia do hviezdy
$n = 16755$ ot/min	nominálne otáčky	$N_s = 12$	počet statorových zubov

Na overenie správnosti navrhnutej metodiky elektromagnetického návrhu BSM s koncentrickým vinutím je vhodné ju konfrontovať s nameranými a vypočítanými rozmermi prototypu BSM s koncentrickým vinutím (Tab. 3).

Tab. 3 Porovnanie nameraných a vypočítaných rozmerov prototypu BSM s koncentrickým vinutím

Namerané rozmery	Vypočítané rozmery	Názov parametru
Stator		
$N_s = 12$	$N_s = 12$	počet statorových zubov
$D_{is} = 65 \text{ mm}$	$D_{is} = 65 \text{ mm}$	vnútorný priemer statora (vítanie)
$l_i = 35 \text{ mm}$	$l_i = 35 \text{ mm}$	ideálna dĺžka statora
$D_{es} = 95,65 \text{ mm}$	$D_{es} = 90,3 \text{ mm}$	vonkajší priemer statora
$l_s = 35 \text{ mm}$	$l_s = 35 \text{ mm}$	dĺžka statora
$d_v = 0,67 \text{ mm}$	$d_v = 0,475 \text{ mm}$	priemer statorových vodičov
$h_{splech} = 0,5 \text{ mm}$	<i>zvolené</i>	hrúbka statorového plechu
$h_{js} = 7,4 \text{ mm}$	$h_{js} = 2,1 \text{ mm}$	výška jarma statora
$w_s = 105$	$w_s = 106$	počet závitov na zub
Namerané rozmery	Vypočítané rozmery	Názov parametru
Rotor		
$D_r = 64 \text{ mm}$	$D_r = 64,9 \text{ mm}$	vonkajší priemer rotora
$l_r = 35 \text{ mm}$	$l_r = 35 \text{ mm}$	dĺžka rotora
$d_h = 15 \text{ mm}$	$d_h = 12 \text{ mm}$	priemer hriadeľa
$l_m = 35 \text{ mm}$	$l_m = 35 \text{ mm}$	aktívna dĺžka motora
$h_{jr} = 18,9 \text{ mm}$	$h_{jr} = 25 \text{ mm}$	výška jarma rotora
$\delta = 1 \text{ mm}$	$\delta = 0,7 \text{ mm}$	veľkosť vzduchovej medzery
$h_{rplech} = 0,5 \text{ mm}$	<i>zvolené</i>	hrúbka rotorového plechu
$h_{plech} = 0,45 \text{ mm}$	<i>zvolené</i>	hrúbka plechu z nemagnetickej ocele
$l_{plech} = 43 \text{ mm}$	<i>zvolené</i>	dĺžka plechu z nemagnetickej ocele
PM		
Namerané rozmery	Vypočítané rozmery	Názov parametru
$h_{PM} = 5 \text{ mm}$	$h_{PM} = 5 \text{ mm}$	výška PM
$l_{PM} = 40 \text{ mm}$	$l_{PM} = 40 \text{ mm}$	dĺžka PM
$b_{PM} = 19 \text{ mm}$	$b_{PM} = 22 \text{ mm}$	šírka PM
$l_{iis} = 2 \text{ mm}$	$l_{iis} = 3 \text{ mm}$	vnútorná vzdialenosť medzi koncami PM

Na základe navrhutej metodiky elektromagnetického návrhu BSM s koncentrickým vinutím sú na Obr. 2 zobrazené pracovné charakteristiky prototypu BSM s koncentrickým vinutím pre rôzne zaťažovacie uhly $\vartheta = (0^\circ - 90^\circ)$. Z dôvodu prehľadnejšieho grafu je príkon P_1 v [kW], výkon P_2 v [kW] a účinnosť η je bezrozmerná veličina [-] (nie je násobená číslom 100).



Obr. 2 Pracovné charakteristiky prototypu BSM s koncentrickým vinutím

3 Elektromagnetická analýza bezkefového motora s koncentrickým vinutím

Dizajnéri a konštruktéri elektrických strojov sa pri svojej práci stretávajú s problematikou modelovania elektrických strojov. Modelovanie je dôležitá súčasť celkového návrhu elektrického stroja, pretože jednotlivé časti elektrického stroja musia byť pred finálnou fázou konštruovania preskúmané a preverené, či už z mechanického, tepelného, elektrického alebo magnetického hľadiska. Inak povedané elektrické stroje musia byť podrobené špeciálnym analýzám ešte vo fáze návrhu elektrického stroja. *Modelovanie* je teda proces, ktorý by mal reagovať na zmenu vstupných údajov. Proces odozvy modelu na zmenu vstupných údajov sa nazýva *simulovanie* [Kutiš, 2006]. Správnosť navrhovaného modelu elektrického stroja závisí od skúseností dizajnérov a konštruktérov, od teoretických znalostí z oblasti elektrických strojov, mechaniky, termomechaniky a pod.

Pomocou MKP, konkrétne programu FEMM 4.2, boli skúmané magnetické polia prototypu BSM s koncentrickým vinutím a SS s rozloženým vinutím, ktorých základné parametre sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 4 Základné parametre skúmaných strojov

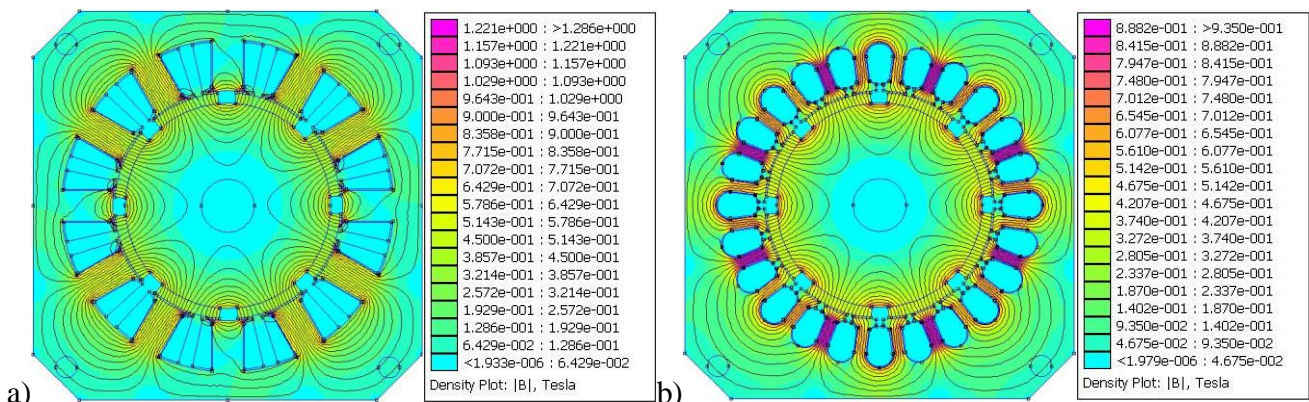
BSM s koncentrickým vinutím		SS s rozloženým vinutím	
Parameter	Názov parametru	Parameter	Názov parametru
$N_s = 12$	počet statorových zubov	$Q = 24$	počet drážok statora
$m = 3$	počet fáz	$m = 3$	počet fáz
$2p = 8$	počet pólov	$2p = 8$	počet pólov
$q_z = 0,5$	počet zubov na pól a fázu	$q_z = 1$	počet drážok na pól a fázu
$\tau_p = 1,5$	pólová vzdialenosť	$\tau_p = 3$	pólová vzdialenosť
$\alpha = 120^\circ$	fázové posunutie napätí v jednotlivých zuboch	$\alpha_d = 60^\circ$	fázové posunutie napätí v jednotlivých drážkach

Magnetické polia BSM s koncentrickým vinutím a SS s rozloženým vinutím boli skúmané v troch prevádzkových stavoch:

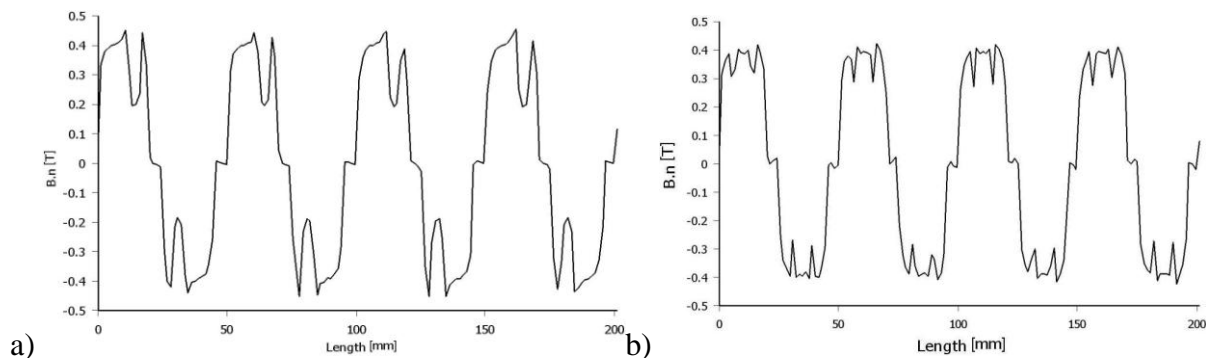
- stav naprázdno,
- zaťažný stav,
- stav reakcie kotvy.

3.1 Skúmanie magnetických polí v zaťažnom stave

Zaťažný stav je v podstate kombináciou stavu naprázdno a stavu reakcie kotvy. Koncentrickým, príp. rozloženým, vinutím statora preteká prúd jednej fázy $I_f = 2,42$ A. PM pre obidva skúmané stroje boli zadané tak, aby ich siločiarly boli kolmo na dotyčnicu rotora. Výsledky elektromagnetickej analýzy v zaťažnom stave sú zobrazené na Obr. 3 a Obr. 4.

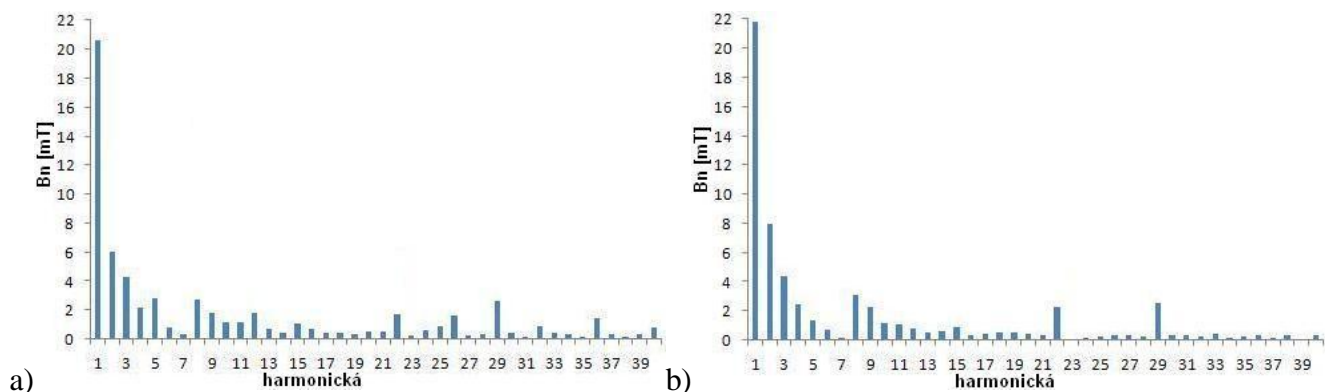


Obr. 3 Mapa magnetického poľa v zaťažnom stave
a) BSM s koncentrickým vinutím, b) SS s rozloženým vinutím



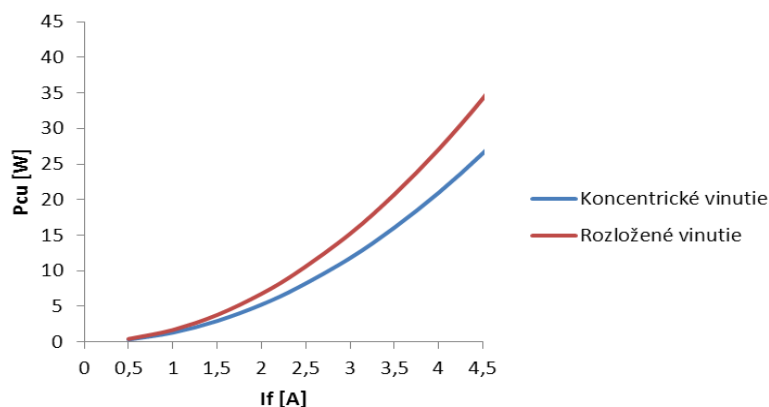
Obr. 4 Normálová zložka indukcia magnetického poľa v zaťaženom stave
a) BSM s koncentrickým vinutím, b) SS s rozloženým vinutím

Na základe výsledkov modelovania magnetických polí skúmaných strojov pre zaťažený stav bola zo získaného dátového súboru normálovej zložky indukcie magnetického poľa, pomocou programu Microsoft Excel, urobená harmonická analýza (Obr. 5). Z obrázkov je vidieť, že pre koncentrické aj rozložené vinutie je spektrum vyšších harmonických takmer rovnaké. Prvá harmonická v oboch prípadoch je výrazná, tretia predstavuje asi 20 % z prvej harmonickej. Pri reálnej prevádzke skúmaných strojov môžu vyššie harmonické spôsobiť vyššiu hlučnosť, vibrácie a pod.



Obr. 5 Spektrum vyšších harmonických vo vzduchovej medzere
a) BSM s koncentrickým vinutím, b) SS s rozloženým vinutím

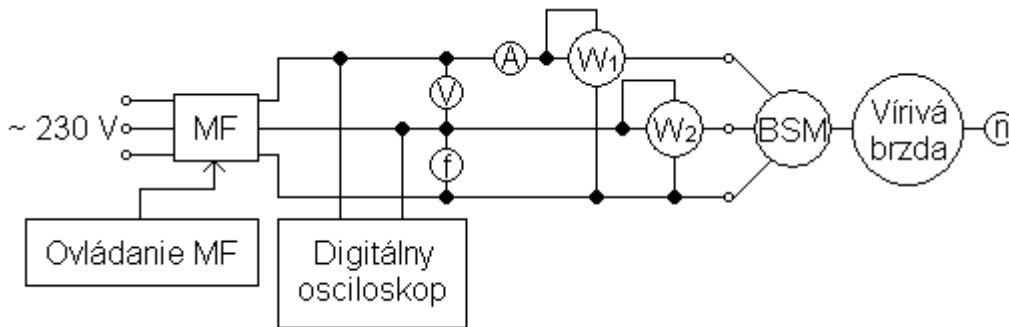
Dôležitým výstupom z elektromagnetickej analýzy v zaťaženom stave bolo stanoviť straty v koncentrickom vinutí a straty v rozloženom vinutí, čiže straty v medi za studena P_{Cu} [W]. Veľkosť strát v medi za studena P_{Cu} boli pre prúdy v rozsahu od $I_f = 0,5$ A do $I_f = 5$ A určené z výslednej mapy magnetického poľa analytickou integráciou cez každý prvok definovanej plochy koncentrického vinutia, príp. rozloženého vinutia. Sčítaním výsledkov pre všetky prvky definovanej plochy som dostal straty v medi za studena P_{Cu} pre koncentrické a rozložené vinutie (Obr. 6).



Obr. 6 Porovnanie koncentrického vinutia a rozloženého vinutia z hľadiska strát v medi za studena P_{Cu}

4 Experimentálne merania na bezkefovom motore s koncentrickým vinutím

Po zapojení meracieho obvodu (Obr. 7) bola overená závislosť pracovnej frekvencie f a požadovaných otáčok n , ďalej bola zmeraná závislosť výstupného napätia MF U_{ef} a frekvencie f , ako aj prúdová charakteristika BSM s koncentrickým vinutím.



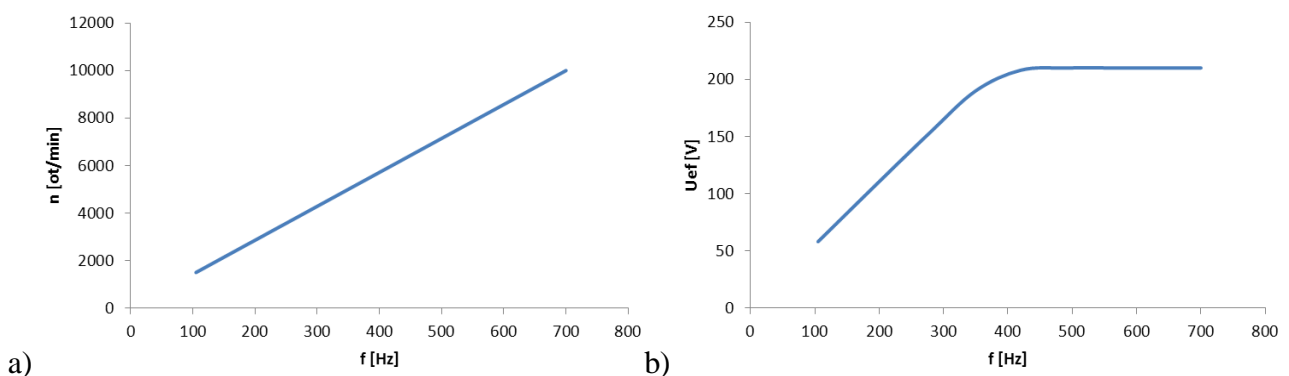
Obr. 7 Schéma zapojenia na meranie zaťažovania BSM s koncentrickým vinutím

4.1 Experimentálne meranie proprietárneho meniča frekvencie

Cieľom tohto merania bolo zistiť, akým spôsobom pracuje MF a či namerané závislosti sú v zhode s teoretickým predpokladmi. Pri meraní závislosti otáčok n a výstupného napätia MF U_{ef} od frekvencie f boli nastavené pomocou MF otáčky BSM s koncentrickým vinutím v rozsahu od 1500 ot/min do 10000 ot/min (Tab. 5). Meraním závislosti $n = f(f)$ (Obr. 8a) boli potvrdené konštrukčné konštanty BSM s koncentrickým vinutím. Z Obr. 8b je zjavné, že v oblasti frekvencií pod 400 Hz pracuje MF v režime regulácie na konštantnú momentovú preťažiteľnosť ($U_{ef} / f = \text{konšt.}$) a v oblasti frekvencií nad 400 Hz pracuje MF v režime konštantného výstupného napätia ($U = \text{konšt.}$), ktorého veľkosť je daná napájaním MF z jednofázovej siete (1 x 230 V).

Tab. 5 Tabuľka nameraných hodnôt pre závislosti $n = f(f)$ a $U_{ef} = f(f)$

n [ot/min]	1500	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	16755
U_{ef} [V]	58	116	154	190	208	210	210	210	210	210
f [Hz]	105	210	280	350	420	490	560	630	700	1173



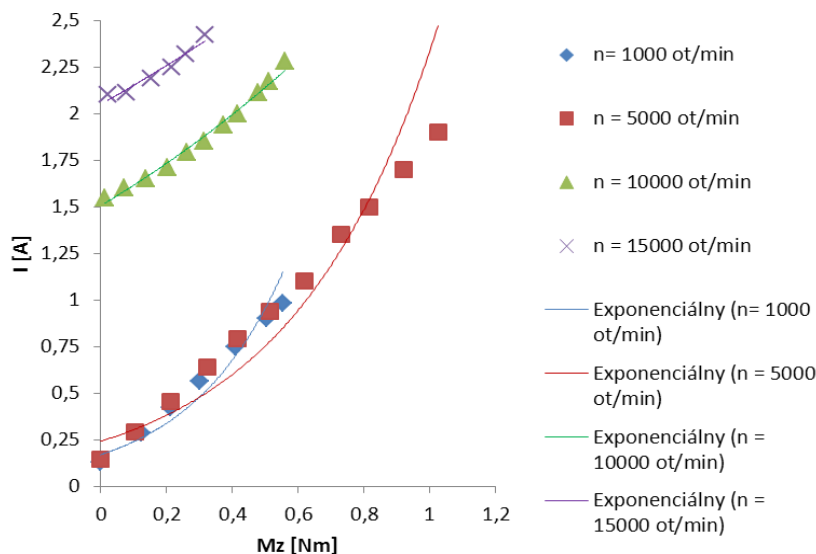
Obr. 8 Namerané závislosti proprietárneho MF

a) $n = f(f)$, b) $U_{ef} = f(f)$

4.2 Experimentálne meranie BSM s koncentrickým vinutím

Z Obr. 7 je vidieť, že vrtľová brzda, ktorou bol BSM s koncentrickým vinutím postupne zaťažovaný, je pomocou hriadeľa spojená s BSM s koncentrickým vinutím. Pri nastavení hodnoty zaťažovacieho momentu M_z sa vo vrtľovej brzde vytvorili vírivé prúdy, čím vznikol brzdný moment, ktorý pôsobil proti otáčkam BSM s koncentrickým vinutím a snažil sa ho brzdiť. Toto brzdenie

predstavuje pre BSM s koncentrickým vinutím stav záťaže. Dôležité bolo vyvážiť vírivú brzdu, aby bol dosiahnutý nulový moment. Proprietárnym MF sa regulovali otáčky BSM s koncentrickým vinutím na požadované hodnoty, pričom otáčky n BSM s koncentrickým vinutím boli počas celého merania konštantné v dôsledku momentovej spätnej väzby. Výsledkom merania BSM s koncentrickým vinutím v zaťažení je závislosť $I = f(M_z)$ (Obr. 9).



Obr. 9 Závislosť $I = f(M_z)$ BSM s koncentrickým vinutím v zaťaženom stave

5 Simulačná schéma bezkefového motora s koncentrickým vinutím

Vlastnosti točivých elektrických strojov sa dajú popísať a zároveň aj vysvetliť pomocou náhradných schém, ktoré sú zobrazené pomocou odporov, indukčností a pod. To znamená, že ich dokážeme popísať pomocou matematických rovníc. Aby sme nemuseli ručne počítat rozsiahle diferenciálne rovnice, parciálne diferenciálne rovnice, integrálne rovnice, matice a pod., tak na tento výpočet je vhodný počítačový program *Matlab*. Pokiaľ by bola požiadavka zostaviť točivý elektrický stroj pomocou blokovej schémy (rešpektuje matematické rovnice skúmaného stroja), tak na túto úlohu je vhodný *Simulink*. Z uvedeného vyplýva, že *Simulink* slúži na simuláciu a modelovanie dynamických systémov pomocou modelov a blokových schém [Kozák, 2007]. Zápis programu zostaveného v *Simulinku* je možné generovať aj v jazyku C, nakoľko *Matlab* ako taký vznikol na základe programovacích jazykov FORTRAN a C++ [Vittek, 1997], [Kozák et al., 1999].

5.1 Matematický model BSM s koncentrickým vinutím

Pre vytvorenie matematického modelu BSM s koncentrickým vinutím bola skonštruovaná schéma modelu BSM s koncentrickým vinutím podľa [Fodrek et al., 2003]. Pri modelovaní BSM s koncentrickým vinutím je potrebné použiť transformáciu trojfázového modelu na dvojfázový model pre statorové veličiny. Výsledkom tejto transformácie je dvojfázový model BSM s koncentrickým vinutím. Avšak v tomto modeli sú statorové rovnice v súradnicovom systéme statora, to znamená, že je potrebné ich transformovať do súradnicového systému rotora.

Rovnice opisujúce model BSM s koncentrickým vinutím v d - q sústave sú:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left(U_{sd} - R_s i_{sd} + \frac{d\theta}{dt} \psi_{sq} \right) \quad (1)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[U_{sq} - R_s i_{sq} - \frac{d\theta}{dt} \psi_{sq} + \psi_{PM} \right] \quad (2)$$

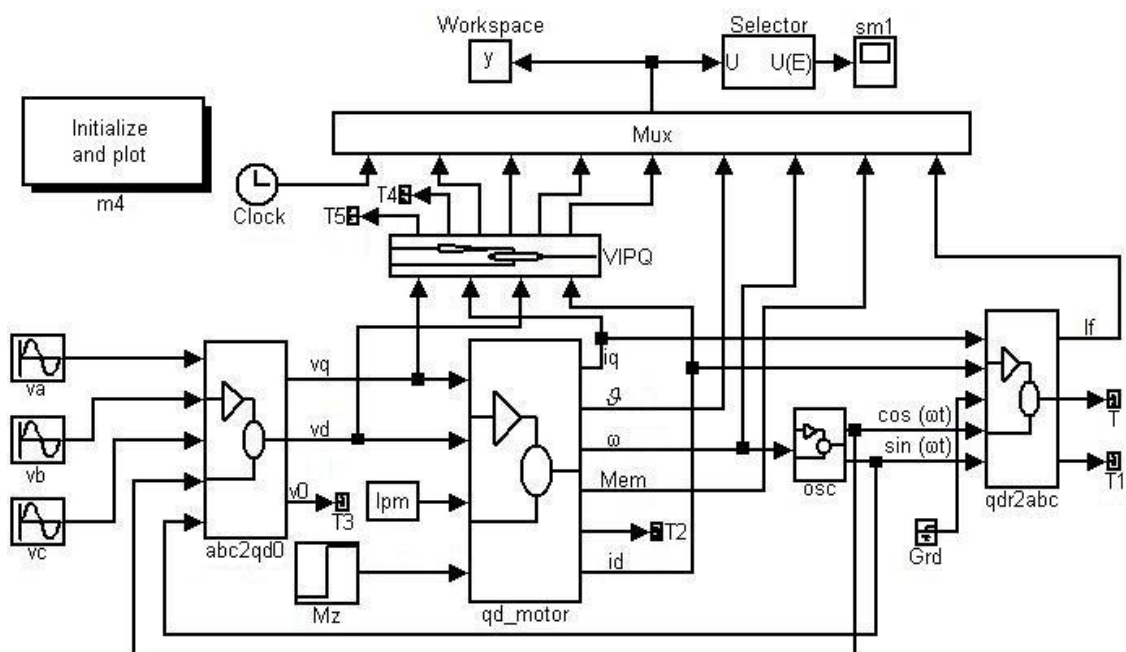
$$M_m = \Psi_{PM} \cdot i_{sq} \quad (3)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1}{J \cdot s + f_t} \cdot (\Psi_{PM} \cdot i_{sq} - M_z) \quad (4)$$

kde i_{sd} [A] je prúd statorového vinutia v smere osi d , L_s [H] je indukcia statorového koncentrického vinutia, U_{sd} [V] je napätie statora v smere osi d , R_s [Ω] je odpor statorového koncentrického vinutia, i_{sq} [A] je prúd statorového vinutia v smere osi q , Ψ_{sq} [H] je magnetická vodivosť statora v smere osi q , i_{sq} [A] je prúd statorového vinutia v smere osi q , U_{sq} [V] je napätie statora v smere osi q , Ψ_{PM} [H] je magnetická vodivosť PM, M_m [Nm] je moment motora, J [kg.m²] je moment zotrvačnosti, s [-] je Laplaceov integrátor a f_t [N] je trenie v závislosti na rýchlosti.

5.2 Simulačná schéma BSM s koncentrickým vinutím

Za účelom dosiahnutia simulačných výsledkov prevádzkových vlastností BSM s koncentrickým vinutím bola v Matlab-Simulink vytvorená simulačná schéma BSM s koncentrickým vinutím (Obr. 10), kde bloky „va“, „vb“, „vc“ predstavujú napájanie z trojfázovej siete, blok „abc2qd0“ umožňuje spraviť transformáciu trojfázovej sústavy na dvojfázovú sústavu, blok „lpm“ definuje magnetizačný prúd rotora, blok „qd_motor“ zabezpečuje simuláciu vlastností BSM s koncentrickým vinutím, blok „osc“ vykonáva transformáciu $\sin \vartheta_r(t)$ a $\cos \vartheta_r(t)$, blok „qdr2abc“ je spätná transformácia dvojfázovej sústavy na trojfázovú sústavu, blok „VIPQ“ vypočíta okamžité hodnoty napätia, prúdu, činného výkonu a jalového výkonu, blok „Mux“ zhromažďuje snímané veličiny a vysiela ich zo snímača. Táto simulačná schéma je uvedená v [Chee-Mun, 1998], avšak odladil a prispôbil som ju tak, aby som dostal prevádzkové vlastnosti BSM s koncentrickým vinutím.

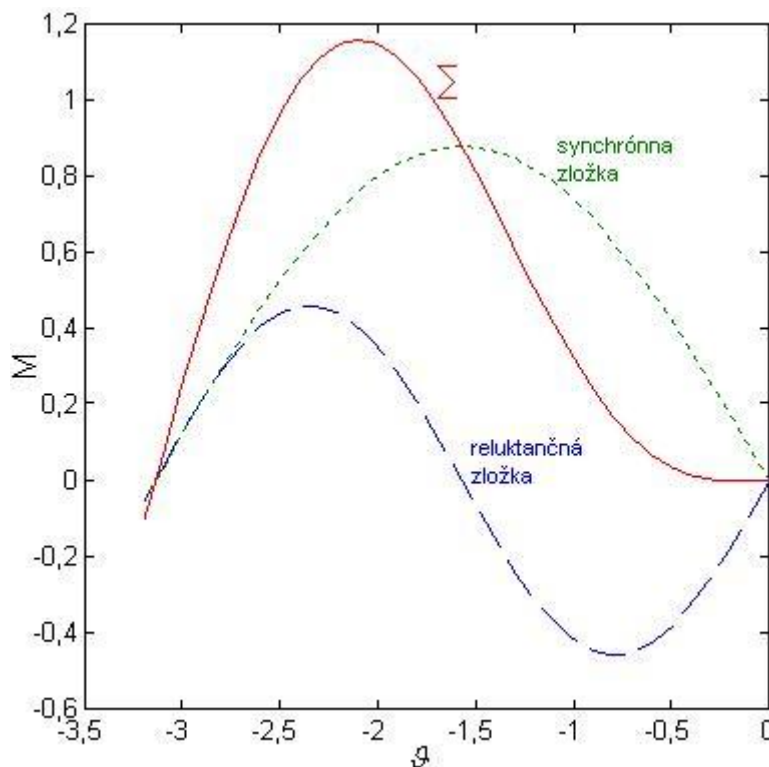


Obr. 10 Simulačná schéma BSM s koncentrickým vinutím

Pre simuláciu bolo potrebné zadefinovať parametre (v pomerných jednotkách) BSM s koncentrickým vinutím (Tab. 6). Ďalej sa do spúšťacieho súboru zadefinovali aj skutočné hodnoty vstupného napätia U_l [V], frekvencie f [Hz] a počtu pólov $2.p$ [-]. Po zadefinovaní vyššie uvedených parametrov sa spustil inicializačný súbor, v ktorom Matlab-Simulink požaduje zadefinovať aj hodnoty vstupného napätia v pomerných jednotkách u_a , magnetizačného prúdu i'_m a zaťažovacieho uhla ϑ . Následne Matlab-Simulink vykreslil závislosť momentu v ustálenom stave M (v pomerných jednotkách) od zaťažovacieho uhla ϑ (Obr. 11).

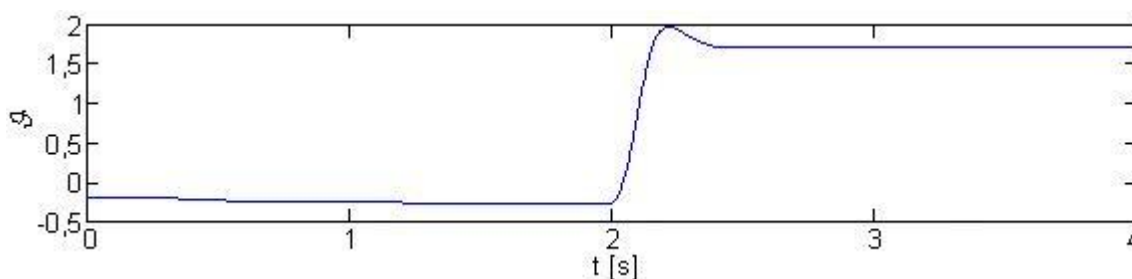
Tab. 6 Zadefinované parametre BSM s koncentrickým vinutím

x_{ls}	x_d	r'_{kd}	x'_{lkd}	H	r_s	x_q	r'_{kq}	x'_{lkq}	D_ω
0,065	0,543	0,054	0,132	0,3	0,017	1,086	0,108	0,132	0



Obr. 11 Závislosť momentu v ustálenom stave od zaťažovacieho uhla $M = f(\vartheta)$

Pre získanie ďalších prevádzkových závislostí BSM s koncentrickým vinutím bolo potrebné spustiť simulačnú schému. Po spustení simulácie sa BSM s koncentrickým vinutím rozbehol na svoje nominálne hodnoty. Následne bol v bloku „Mz“ zadenovaný zaťažovací moment M_z [Nm], ktorý v čase $t = 2$ s sa pripojí k BSM s koncentrickým vinutím („qd_motor“). Pripojenie zaťažovacieho momentu M_z je vidieť napr. na závislosti zaťažovacieho uhla ϑ od času t (Obr. 12).



Obr. 12 Závislosť zaťažovacieho uhla od času $\vartheta = f(t)$

6 Odporúčania pre celkový návrh bezkefového motora s koncentrickým vinutím

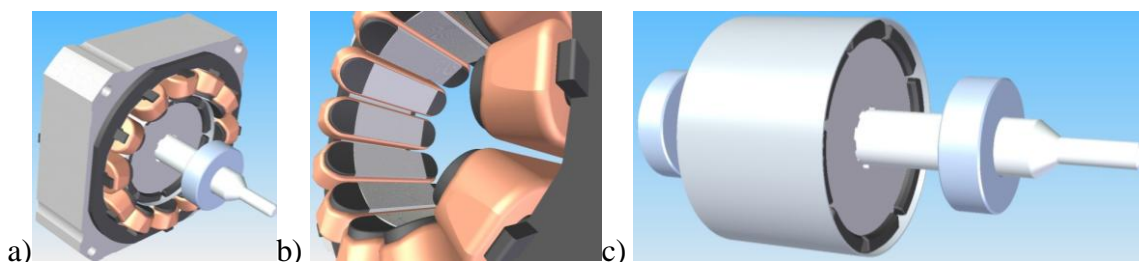
Z analýzy magnetického poľa a z harmonickej analýzy možno skonštatovať, že BSM s koncentrickým vinutím má niektoré vyššie harmonické výraznejšie ako SS s rozloženým vinutím, čo môže v reálnej prevádzke spôsobovať vyššiu hlučnosť (mechanickú, magnetickú), vibrácie, zníženie účinnosti, zvýšenie strát, zvýšenie efektívnej hodnoty odoberaného prúdu, prenikavé rušenie, prídavné magnetické pole rotujúce odlišnou frekvenciou (napätie vyšších harmonických) a pod. Preto je potrebné uvažovať s vplyvom vyšších harmonických už pri návrhu elektrického stroja, pretože skonštruovaný motor môže mať v dôsledku vyšších harmonických odlišné pracovné charakteristiky v porovnaní s očakávanými pracovnými charakteristikami.

Ako je vidieť vyššie harmonické majú výrazný vplyv na prevádzku BSM s koncentrickým vinutím. Preto by bolo vhodné, aby výrobcovia BSM s koncentrickým vinutím vhodne upravili koncept motora tak, aby dosiahli zníženie vyšších harmonických vo vzduchovej medzere, napr. použitím dvojvrstvového koncentrického vinutia. Ďalšou alternatívou ako eliminovať vplyv vyšších harmonických je zaradiť do obvodu aktívny filter, pásmovú priepust a pod.

Na základe analýzy vlastností BSM s koncentrickým vinutím z hľadiska metodiky elektromagnetického návrhu, elektromagnetickej analýzy, experimentálneho merania a simulácie v programe Matlab-Simulink, ktorú som spravil v predchádzajúcich kapitolách, ako aj životného cyklu výrobku, predkladám jednotlivé body, na základe ktorých je možné vypracovať *odporúčania celkového návrhu BSM s koncentrickým vinutím pre prax*:

- a) Stanovenie základných parametrov BSM s koncentrickým vinutím.
- b) Definovanie požiadaviek aplikácie, v ktorej bude BSM s koncentrickým vinutím používaný a definovanie predpokladaného času prevádzky.
- c) Na základe bodu a) výpočet hlavných rozmerov BSM s koncentrickým vinutím – vnútorný priemer statora (vítanie) D_{is} a ideálna dĺžka statora l_i .
- d) Výpočet ostatných rozmerov a veličín BSM s koncentrickým vinutím – geometrické rozmery statora, geometrické rozmery rotora a PM, magnetický obvod, počet závitov statora, odpor statorového vinutia, reaktancie, straty a pracovné charakteristiky.
- e) Pomocou MKP sa elektromagnetickou analýzou stanoví veľkosť indukcie magnetického poľa B v jednotlivých častiach BSM s koncentrickým vinutím, veľkosť normálovej zložky indukcie magnetického poľa B_n vo vzduchovej medzere, veľkosť strát v jednotlivých častiach BSM s koncentrickým vinutím a pod.
- f) Pomocou MKP sa tepelnou analýzou stanovujú tepelné straty a pod.
- g) Simulačnou analýzou v programe Matlab-Simulink sa stanovujú priebehy pracovných charakteristík, pomocou ktorých je možné overiť prevádzkové vlastnosti BSM s koncentrickým vinutím.
- h) Na základe dosiahnutých výsledkov je potrebné spraviť optimalizáciu rozmerov a veličín BSM s koncentrickým vinutím tak, aby bol mechanický, elektrický a magnetický obvod maximálne využitý.
- i) Na základe bodov a) až h) sa navrhovaný BSM s koncentrickým vinutím vyrobí.
- j) Keďže BSM s koncentrickým vinutím dokáže pracovať len v spolupráci s MF, tak je potrebné navrhnuť a vyrobiť aj MF s filtráciou vyšších harmonických na jeho výstupe.
- k) Na základe bodov i) a j) je potrebné experimentálnym meraním overiť pracovné charakteristiky vyrobeného BSM s koncentrickým vinutím a jeho MF.
- l) Identifikácia parametrov BSM s koncentrickým vinutím.

Pri použití MKP je vhodné z hľadiska presnejších výsledkov pracovať s trojrozmernou analýzou (elektromagnetická, tepelná) skúmaného stroja. Vhodným počítačovým programom na zostrojenie trojrozmerného prevedenia navrhovaného stroja je Solid Edge, CATIA a pod. Preto som na základe nameraných rozmerov (Tab. 1), zadaných rozmerov (Tab. 2) a vypočítaných rozmerov (Tab. 3) z bodov c) a d) skúmaný BSM s koncentrickým vinutím nakreslil v prostredí programu Solid Edge do trojrozmerného prevedenia (Obr. 13). Takýto trojrozmerný model je vhodný na trojrozmernú elektromagnetickú, príp. tepelnú, analýzu pomocou MKP v programe ANSYS alebo FLUX.



Obr. 13 Trojrozmerný BSM s koncentrickým vinutím
a) stator a rotor, b) koncentrické vinutie, c) rotor

Záver

Prvá kapitola dizertačnej práce sa venuje problematike materiálov PM a analýze vlastností jednotlivých typov točivých elektrických strojov, ktoré na budenie využívajú PM (SS, BM – BJM, BSM).

Postup metodiky elektromagnetického návrhu BMKV, ktorá predstavuje významnú časť celkového návrhu točivého elektrického stroja, je predstavená v druhej kapitole. Na základe nameraných rozmerov, zadaných parametrov a navrhutej metodiky elektromagnetického návrhu som vykonal prepočet reálneho prototypu BSM s koncentrickým vinutím, pomocou ktorého som verifikoval správnosť navrhutej metodiky elektromagnetického návrhu.

V tretej kapitole je predstavená MKP a tri počítačové programy, ktoré sa v súčasnosti používajú na skúmanie úloh MKP (FEMM, FLUX, ANSYS). Programom FEMM sú detailne skúmané magnetické polia prototypu BSM s koncentrickým vinutím a SS s rozloženým vinutím v rôznych prevádzkových stavoch. V dôsledku použitia proprietárneho MF bolo dôležité pomocou Fourierovej transformácie vykonať analýzu vyšších harmonických vo vzduchovej medzere skúmaných strojov. Z máp magnetického poľa a analýzy vyšších harmonických vo vzduchovej medzere skúmaných strojov boli stanovené straty v medi za studena P_{Cu} v koncentrickom vinutí a straty v rozloženom vinutí.

Experimentálnym meraniam, ktoré slúžia na overenie vlastností navrhnutého prototypu BSM s koncentrickým vinutím z predchádzajúcich dvoch kapitol, sa venuje štvrtá kapitola. Experimentálnym meraním na proprietárnom MF bol verifikovaný princíp činnosti tohto typu MF. Ďalej na prototypu BSM s koncentrickým vinutím boli vykonané experimentálne merania v zaťaženom stave.

Verifikovanie prevádzkových vlastností točivých elektrických strojov pomocou simulácií je uvedené v piatej kapitole, v ktorej je spracovaná problematika simulácii prevádzkových vlastností BMKV v prostredí programu Matlab-Simulink. Ďalej je v tejto kapitole vytvorený matematický model prototypu BSM s koncentrickým vinutím.

V poslednej kapitole predloženej dizertačnej práce sú opísané poznatky, ktoré som získal na základe skúmania vlastností BSM s koncentrickým vinutím. Podrobne sú opísané možné spôsoby eliminácie vplyvu vyšších harmonických na prevádzku BSM s koncentrickým vinutím. Záverom tejto kapitoly sú vypracované odporúčania pre celkový návrh BSM s koncentrickým vinutím, ktoré sú vhodné pre potreby praxe.

Prínosy dizertačnej práce

Hlavným prínosom dizertačnej práce je spracovanie metodiky elektromagnetického návrhu BSM s koncentrickým vinutím.

Hlavné prínosy pre vedu:

- dizertačná práca poskytuje ucelený pohľad na problematiku elektromagnetického návrhu BSM s koncentrickým vinutím s povrchovými PM,
- podrobne opisuje postup elektromagnetickej analýzy pomocou MKP s použitím programu FEMM 4.2,
- porovnáva a opisuje vplyv vyšších harmonických vo vzduchovej medzere BSM s koncentrickým vinutím a SS s rozloženým vinutím v zaťaženom stave, pričom zobrazuje a opisuje aj jednotlivé spôsoby eliminácie vplyvu vyšších harmonických,
- z hľadiska veľkosti strát v medi za studena porovnáva BSM s koncentrickým vinutím a SS s rozloženým vinutím,
- experimentálnym meraním nameraných závislostí BSM s koncentrickým vinutím potvrdzuje teoretické predpoklady kladené na tento typ točivého elektrického stroja, pričom aj režimy činnosti proprietárneho MF sú v zhode s teoretickými predpokladmi,
- zobrazuje a opisuje simulačnú schému BSM s koncentrickým vinutím.

Hlavné prínosy pre prax:

- dizertačná práca poskytuje ucelené informácie z pohľadu elektromagnetického namáhania BSM s koncentrickým vinutím s povrchovými PM pri rôznych prevádzkových stavoch,

- porovnanie dosiahnutých výsledkov metodiky elektromagnetického návrhu, elektromagnetickej analýzy pomocou MKP, experimentálneho merania a simulačných výsledkov v prostredí programu Matlab-Simulink deklaruje dôveryhodnosť metodiky elektromagnetického návrhu BSM s koncentrickým vinutím, ktorú je možné použiť pre potreby konštruktárskej praxe,
- dáva odporúčania pre prax z hľadiska celkového návrhu BSM s koncentrickým vinutím s povrchovými PM, ktoré sú vhodné pre dizajnérov a konštruktérov tohto typu točivého elektrického stroja.

Summary

Dissertation thesis is mainly focused on electromagnetic design of a AC brushless motor with concentrated winding. Thesis is divided into six chapters. First chapter describes current technology status of the AC brushless motors with surface mounted permanent magnets on the rotor. Focus of this work is concentrated from the second chapter after. Second chapter describes processing of electromagnetic design methodology for the AC brushless motor with concentrated winding. In the third chapter an electromagnetic analysis of the AC brushless motor with concentrated winding using the finite element method is made for three cases: no-load condition, loaded condition and the condition of armature reaction. The fourth chapter deals with experimental measurements on the real AC brushless motor with concentrated winding supplied via variable voltage variable frequency inverter. The fifth chapter shows and describes Matlab-Simulink simulation schemes of the AC brushless motor with concentrated winding. Based on evaluation of results obtained from the second, third, fourth and fifth chapter, conclusions and recommendations for practice are made in sixth chapter.

Zoznam bibliografických odkazov

- UHRÍK, M. 2012: *BLDC motory a SMPM*. [elektronická verzia]. Zborník prednášok z predmetu Elektrické pohony mechatronických systémov. Prednáška č. 2. 2011. s. 4-29. [Cit. 2013-06-25]. Dostupné na:
<http://www.kesp.elf.stuba.sk/sk/Pedagogika/EPoMS/PR2-BLDC_motory_a_SMPM.pdf>
- HRABOVCOVÁ, V. – JANOUŠEK, L. – RAFAJDUS, P. – LIČKO, M. 2001a: *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5. s. 50-66.
- SEKERÁK, P. – HRABOVCOVÁ, V. – PYRHÖNEN, J. – KALAMEN, L. – RAFAJDUS, P. – ONUFER, M. 2012: *Ferrites and different winding types in permanent magnet synchronous motor*. In: Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 63. No. 3. ISSN 1335-3632. 2012. s. 162-170.
- HRUŠKOVICĎ, L. 2004: *Elektrické stroje*. 2. opravené vydanie. Bratislava: Vydavateľstvo STU Bratislava, 2004. ISBN 80-227-2139-5. s. 274-277.
- HRABOVCOVÁ, V. – JANOUŠEK, L. – RAFAJDUS, P. – LIČKO, M. 2001b: *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5. s. 79-86.
- GIERAS, J. F. – WING, M. 1997a: *Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1997. ISBN 0-8247-9794-9. s. 171-172.
- LAVRINOVICHA, L. – DIRBA, J. – LAVRINOVICH, N. 2013: *Magnestotatic analysis of surface mounted permanent magnet motor with external rotor for use in electric hand planer*. 14th International Scientific Conference – ELECTRIC POWER ENGINEERING 2013, Kouty nad Desnou, Czech Republic. 2013. May 28-30. ISBN 978-80-248-2988-3. s. 211-214.
- NALEPA, R. – ORLOWSKA-KOWALSKA, T. 2012: *Optimum trajectory control of the current vectory of a nonsalient-pole PMSM in the field-weakening region*. [elektronická verzia]. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59. No. 7. ISSN 0278-0046. 2012. s. 2867-2876. [Cit. 2013-07-02]. Dostupné na:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5715871>>
- LIU, H. – ZHU, Z. Q. – MOHAMED, E. – FU, Y. – QI, X. 2012: *Flux-weakening control of nonsalient pole PMSM having large winding inductance, accounting for resistive voltage drop and*

- inverter nonlinearities*. [elektronická verzia]. In: IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27. No. 2. ISSN 0885-8993. 2012. s. 942-952. [Cit. 2013-07-08]. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5873156>>
- TÁRNIK, M. – MURGAŠ, J. 2011: *Model reference adaptive control of permanent magnet synchronous motor*. In: Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 62. No. 3. ISSN 1335-3632. 2011. s. 117-125.
- SIAMI, M. – GHOLAMIAN, S. A. – YOUSEFI, M. 2013: *A comparative study between direct torque control and predictive torque control for axial flux permanent magnet synchronous machines*. In: Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 64. No. 6. ISSN 1335-3632. 2013. s. 346-353.
- MASSOUM, A. – MEROUFEL, A. – WIRA, P. – FELLAH, M. K. 2012: *Fuzzy control of the permanent magnet synchronous machine singularly perturbed fed by a three level inverter*. In: Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 63. No. 3. ISSN 1335-3632. 2012. s. 186-190.
- HRABOVCOVÁ, V. – JANOUŠEK, L. – RAFAJDUS, P. – LIČKO, M. 2001c: *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5. s. 217-229.
- SALAH, W. A. – ISHAK, D. – HAMMADI, K. J. 2011: *PWM switching strategy for torque ripple minimization in BLDC motor*. In: Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 62. No. 3. ISSN 1335-3632. 2011. s. 141-146.
- QIANG, L. – HAI, H. – BINCHUAN, Y. 2008: *The study of PWM methods in permanent magnet brushless DC motor speed control system*. [elektronická verzia]. International Conference on Electrical Machines and Systems – ICEMS 2008, Wuhan, China. 2008. October 17-20. ISBN 978-1-4244-3826-6. s. 3897-3900. [Cit. 2012-10-31]. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4771460>>
- CUNSHAN, Z. – DUNX IN, B. 2008: *A PWM control algorithm for eliminating torque ripple caused by stator magnetic field jump of brushless DC motors*. [elektronická verzia]. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation – WCICA 2008. Chongping, China. 2008. June 25-27. ISBN 978-1-4244-2113-8. s. 6547-6549. [Cit. 2012-10-31]. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4592891>>
- DIRBA, J. – LAVRINOVICHA, L. – ONZEVS, O. – VITOLINA, S. 2012: *The influence of permanent magnet parameters on the effectiveness of brushless dc motor with outer rotor*. 21th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion – SPEEDAM 2012, Sorrento, Italy. 2012. June 20-22. ISBN 978-1-4673-1299-8. s. 718-723.
- HRABOVCOVÁ, V. – JANOUŠEK, L. – RAFAJDUS, P. – LIČKO, M. 2001d: *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5. s. 235-239.
- KLUG, E. – DUČ-ANCI, M. 2008: *Magnetic field of the armature winding of permanent magnet synchronous motors with concentrated coils on the stator*. XVI. International Symposium on Electric Machinery in Prague – ISEM 2008, Prague, Czech Republic. 2008. September 10-11. ISBN 978-80-01-04172-7. s. 151-154.
- JUSSILA, H. – SALMINEN, P. – PYRHÖNEN, J. 2006: *Losses of a permanent magnet synchronous motor with concentrated windings*. [elektronická verzia]. The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives – PEMD 2006, Dublin, Ireland. 2006. April 4-6. ISBN 0-86341-609-8. 2006. s. 207-211. [Cit. 2012-11-06]. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4123515&tag=1>>
- LEE, S. H. – HONG, J. P. 2008: *A study on the acoustic noise reduction of interior permanent magnet motor with concentrated winding*. [elektronická verzia]. Industry Applications Society Manual Meeting – IAS '08, Edmonton, Canada. 2008. October 5-9. ISBN 978-1-4244-2278-4. 2008. s. 1-5. [Cit. 2014-02-26]. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4658826>>
- REICHERT, T. – KOLAR, J. W. – NUSSBAUMER, T. 2013: *Stator tooth design study for bearingless exterior rotor PMSM*. [elektronická verzia]. In: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49. No. 4. ISSN 0093-9994. 2013. s. 1515-1522. [Cit. 2014-03-04]. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6497596>>

- ZHANG, P. – SIZOV, G. Y. – JIANGBIAO, H. – INEL, D. M. – DEMERDASH, N. A. O. 2013: *Calculation of magnet losses in concentrated winding permanent magnet synchronous machines using a computationally efficient finite element method*. [elektronická verzia]. In: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49. No. 6. ISSN 0093-9994. 2013. s. 2524-2532. [Cit. 2014-03-06]. Dostupné na:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6518153>>
- YAMAZAKI, K. – FUKUSHIMA, Y. 2011: *Effect of study current loss reduction by magnet segmentation in synchronous motor with concentrated winding*. [elektronická verzia]. In: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47. No. 2. ISSN 0093-9994. 2011. s. 779-788. [Cit. 2014-03-06]. Dostupné na:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5680634>>
- GIERAS, J. F. – WING, M. 1997b: *Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1997. ISBN 0-8247-9794-9. s. 273-274.
- MAYER, I. 1963: *Teória indukčného stroja*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, n. p., SVŠT v Bratislave, 1963. s. 24-42.
- KOPYLOV, I. P. a kolektív 1988a: *Stavba elektrických strojů*. 1. vydanie. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1988. DT 621.313(075.8). s. 96-103.
- KOPYLOV, I. P. a kolektív 1988b: *Stavba elektrických strojů*. 1. vydanie. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1988. DT 621.313(075.8). s. 370-371.
- MAGUREANU, R. – VASILE, N. 1990: *Servomotoare fara perii tip sincron*. Bucuresti: Editura Tehnica Bucuresti, 1990. ISBN 973-31-0162-1, s. 160-322.
- KOPYLOV, I. P. a kolektív 1988c: *Stavba elektrických strojů*. 1. vydanie. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1988. DT 621.313(075.8). 357 s.
- KOTAL, M. – NOVOTNÝ, P. – VOŽENÍLEK, P. 1992: *Příklady výpočtu elektrických strojů točivých*. Vydanie: dotlač. Praha: Ediční středisko ČVUT v Prahe, 1992. Číslo publikace 7697.129 s.
- Katalóg magnetizačných kriviek dynamových plechov statora a rotora od spoločnosti BSH Drives and Pumps s. r. o. Factory Michalovce, 2013.
- VALENT, F. – HÜTTNER, L. – PESSEL, I. 1981: *Elektrické prístroje. Návod na cvičenia*. 2. vydanie. Bratislava: Edičné stredisko SVŠT v Bratislave, 1981. s. 135-136. Edičné číslo 2160.
- HRABOVCOVÁ, V. – JANOUŠEK, L. – RAFAJDUS, P. – LIČKO, M. 2001e: *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5. s. 247-249.
- CHUDIVÁNI, J. 2009: *Bezkefový motor s elektronickou komutáciou*. Bratislava: FEI STU, 2009. s. 40-58. Diplomová práca.
- HRUŠKOVIČ, L. 1980: *Elektrické stroje II*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave v Edičnom stredisku SVŠT, 1980. 69 s. Edičné číslo 1893.
- KALOUSEK, M. – HUČKO, B. 1996: *Prenos tepla*. 1. vydanie. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1996. 189 s. ISBN 80-227-0881-X.
- Katalóg PM typu Strontium Ferrite SR4B od spoločnosti BSH Drives and Pumps s. r. o. Factory Michalovce, 2013.
- <http://www.magnete.de/uploads/tx_fbmagneticfieldcalc/HF_30_26_Version_0_01.pdf> [Cit. 2013-09-13].
- KUTIŠ, V. 2006: *Základy modelovania a simulácií*. [elektronická verzia]. 2006. 1 s. [Cit. 2012-07-11]. Dostupné na:
<<http://aladin.elf.stuba.sk/Katedry/KMECH/slovakversion/person/kutis/ZMS.pdf>>
- MURÍN, J. 2009a: *Metóda konečných prvkov*. [elektronická verzia]. Zborník prednášok z predmetu Aplikovaná mechanika. Prednáška č. 2 – MKP. 2009. s. 1-10. [Cit. 2012-07-11]. Dostupné na:
<http://kmech.elf.stuba.sk/dokumenty/APLIMECH/prednaska_c2.pdf>
- MEEKER, D. 2010: *Finite Element Method Magnetics*. User's manual. Version 4.2, 2010. 6 s.
<<http://www.cedrat.com/en/software/flux.html>> [Cit. 2012-07-12].
- MURÍN, J. 2009b: *Úvod do MKP*. [elektronická verzia]. Zborník prednášok z predmetu Aplikovaná mechanika. Prednáška č. 1. 2009. s. 21-22. [Cit. 2012-07-12]. Dostupné na:
<http://kmech.elf.stuba.sk/dokumenty/APLIMECH/prednaska_c2.pdf>

- DRÁPALA, J. – KURSA, M. 2012: *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. 219 s. ISBN 978-80-248-2570-0.
- CIGÁNEK, L. 1958: *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. L 25b-C3-4-II/5198. s. 402-406.
- KOZÁK, Š. 2007: *Úvod 00 Matlab 7-01*. [elektronická verzia]. Zborník prednášok na CD z predmetu Matlab v silnoprúdovej elektrotechnike. Prednáška č. 1. 2007. 12 s. [Cit. 2012-07-13].
- VITTEK, J. 1997: *Matlab pre elektrické pohony*. Žilina. Žilinská univerzita, 1997. 5 s.
- KOZÁK, Š. – KAJAN, S. 1999: *Matlab-Simulink*. 1. vydanie. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1999. 9 s. ISBN 80-227-1213-2.
- FODREK, P. – MURGAŠ, J. 2003: *Model synchrónneho motora s permanentným magnetom*. In: EE – časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a telekomunikačné technológie, roč. 9, mimoriadne číslo – vydanie ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2003 – ELOSYS 2003, Trenčín, Slovenská republika, 2003, 9.-12. október 2003. ISSN 1335-2547. s. 120-123.
- CHEE-MUN, O. 1998: *Dynamic Simulation of Electric Machinery. Using Matlab®/Simulink*. 1. vyd. New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1998. ISBN 0-13-723785-5. s. 326-335.
- SZATHMÁRY, P. 2014: Vyššie harmonické v napätí a prúde. Zborník prednášok z predmetu Kvalita elektriny. 2014. s. 83-92. [Cit. 2014-02-24]. Dostupné na: <http://people.tuke.sk/peter.szathmary/Prednaska_Harmonicke.pdf>
- REDDY, P. N. – AMARNATH, J. – REDDY, P. L. 2012: *Simple and novel hybrid random pwm algorithm for dtc-induction motor drive for reduced acoustical noise*. In: Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 12. No. 4. ISSN 1335-8243. 2012. s. 69-75.
- REDDY, P. N. – JAHNS, T. M. – McCLEER, P. J. – BOHN, T. P. 2010: *Design, analysis and fabrication of a high performance fractional slot concentrated winding surface PM machine*. [elektronická verzia]. Energy Conversion Congress and Exposition – ECCE 2010, Atlanta, United States. 2010. September 12-16. ISBN 978-1-4244-5286-6. 2010. s. 1074-1081. [Cit. 2014-02-24]. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5617859>>
- LIŠKA, M. – KOVAL, P. 2011: *Modeling of nonlinear VA-characteristic with the active upper harmonics filter*. 13th Conference of Doctoral Students – ELITECH '11, Bratislava, Slovak Republic. 2011. May 17. ISBN 978-80-227-3500-1. 2011. s. 1-4.
- FRIC, R. 2009: *PDM, PLM*. [elektronická verzia]. Zborník prednášok z predmetu Konštruovanie vyššími CAD systémami. Prednáška č. 1 – PDM, PLM. 2009. s. 1-8. [Cit. 2014-01-31]. Dostupné na: <<http://aladin.elf.stuba.sk/Katedry/KMECH/slovakversion/Predmety/KVCADS/prednaska01-PDM,PLM.pdf>>

Zoznam publikácií autora

- [1] CHUDIVÁNI, J. 2011: *Bezkefové motory*. In: Posterus [elektronická verzia], Vol. 4, No. 12. ISSN 1338-0087. 2011. s. 1-6. Dostupné na: <<http://www.posterus.sk/?p=12326>>.
- [2] CHUDIVÁNI, J. – HÜTTNER, L. 2012: *Sources of the Wind Power Stations*. In: Power Engineering 2012. Renewable Energy Sources 2012. 3rd International Scientific Conference – OZE 2012, Tatranské Matliare, Slovakia. 2012. May 15-17. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, ISBN 978-80-89402-48-9. 2012. s. 297-298.
- [3] CHUDIVÁNI, J. 2012: *Fixation of Surface Mounted Permanent Magnets on the Rotor Synchronous Motor*. In: 14th Conference of Doctoral Students – ELITECH '12, Bratislava, Slovakia. 2012. 22 May. Bratislava: Nakladateľstvo STU, ISBN 978-80-227-3705-0. 2012. s. 1-5.
- [4] CHUDIVÁNI, J. 2012: *Simulácia synchrónneho stroja s permanentnými magnetmi*. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku, Roč. 18. č. 4. ISSN 1335-2547. 2012. s. 16-18.

- [5] CHUDIVÁNI, J. – HÜTTNER, Ľ. 2012: *Elektromagnetický prepočet bezkefového motora s permanentnými magnetmi*. In: Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2012 – ELOSYS 2012, Trenčín, Slovensko. 2012. Október 9.-12. Bratislava FEI STU, ISSN 1335-2547. 2012. s. 190-194.
- [6] CHUDIVÁNI, J. 2012: *Investigation the Properties of Brushless Motor with Electronic Commutation*. In: Mezinárodní konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012 – MMK 2012. Sborník příspěvku z mezinárodní vědecké konference. Hradec Králové, Czech Republic. 2012. December 10-14. Hradec Králové: Magnanimitas, ISBN 978-80-905243-3-0. 2012. s. 3014-3023.
- [7] CHUDIVÁNI, J. 2013: *Investigation the Magnetic Fields of Brushless Motor with Concentrated Coils on the Stator*. In: Posterus [elektronická verzia], Vol. 6, No. 2. ISSN 1338-0087. 2013. s. 1-5. Dostupné na: <<http://www.posterus.sk/?p=14654>>.
- [8] CHUDIVÁNI, J. 2013: *Investigation the Operating Properties of Synchronous Brushless Motor Used in Vacuum Cleaner*. In: International Doctoral Seminar 2013 – IDS 2013. Proceedings of the 8th International Doctoral Seminar 2013. Dubrovnik, Croatia. 2013. May 13-15. Zagreb: University of Zagreb, ISBN 978-953-6071-40-1. 2013. s. 126-132.
- [9] CHUDIVÁNI, J. 2013: *Investigation the Operating Properties of Brushless Motor Used in Dental Technology*. In: 17th International Student Conference on Electrical Engineering – Poster 2013, Prague, Czech Republic. 2013. 16 May. Prague: CTU, ISBN 978-80-01-05242-6. s. 1-5.
- [10] CHUDIVÁNI, J. – HÜTTNER, Ľ. – JANÍČEK, F. 2013: *Chosen Properties Synchronous Machine Used as a Source of Electricity in the Wind Power Station*. In: Renewable Energy Sources 2013. 4th International Scientific Conference – OZE 2013, Tatranské Matliare, Slovakia. 2013. May 21-23. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, ISBN 978-80-89402-64-9. 2013. s. 489-494.
- [11] CHUDIVÁNI, J. – HÜTTNER, Ľ. – KUBICA, J. 2013: *The Electromagnetic Calculation of Synchronous Brushless Motor with Electronic Commutation*. In: Electric Power Engineering 2013. 14th International Scientific Conference, Kouty nad Desnou, Czech Republic. 2013. May 28-30. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, ISBN 978-80-248-2988-3. 2013. s. 355-358.
- [12] CHUDIVÁNI, J. 2013: *Comparison the Magnetic Fields of Synchronous Brushless Motor*. In: 15th Conference of Doctoral Students – ELITECH '13, Bratislava, Slovakia. 2013. 5 June. Bratislava: Nakladateľstvo STU, ISBN 978-80-227-3947-4. 2013. s. 1-5.
- [13] CHUDIVÁNI, J. – HÜTTNER, Ľ. – UHRÍK, M. 2013: *Properties the Concentrated Windings Used in Electric Machines*. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku, Roč. 19, mimoriadne číslo: konferencia ELOSYS 2013, Trenčín, Slovensko. 2013. Október 15.-18. ISSN 1335-2547. 2013. s. 113-117.
- [14] CHUDIVÁNI, J. – HÜTTNER, Ľ. 2013: *Bezkefový synchronný motor s koncentrickým a s rozloženým vinutím*. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku, Roč. 19. č. 6. ISSN 1335-2547. 2013. s. 28-30.
- [15] CHUDIVÁNI, J. 2013: *The Magnetic Fields of Inset Permanent Magnet Synchronous Motor*. In: Posterus [elektronická verzia], Vol. 7, No. 3. ISSN 1338-0087. 2014. s. 1-8. Dostupné na: <<http://www.posterus.sk/?p=16780>>.
- [16] CHUDIVÁNI, J. – HÜTTNER, Ľ. 2014: *Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Power Plants*. In: Renewable Energy Sources 2014. 5th International Scientific Conference – OZE 2014, Tatranské Matliare, Slovakia. 2014. May 20-22. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, ISBN 978-80-89402-74-8. 2014. CD.
- [17] CHUDIVÁNI, J. – KUJAN, V. – HÜTTNER, Ľ. – JANÍČEK, F. 2014: *Use of Induction Generators at Wind Power Plants*. In: Renewable Energy Sources 2014. 5th International Scientific Conference – OZE 2014, Tatranské Matliare, Slovakia. 2014. May 20-22. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, ISBN 978-80-89402-74-8. 2014. CD.

- [18] CHUDIVÁNI, J. 2014: *Comparison the Magnetic Fields of Synchronous Motor with Disributed Winding*. In: 16th Conference of Doctoral Students – ELITECH '14, Bratislava, Slovakia. 2014. 4 June. Bratislava: Nakladateľstvo STU, ISBN 978-80-227-4171-2. 2014. s. 1-4.

Doteraz nezverejnené publikácie zaslané do redakcií zahraničných odborných časopisov:

- [19] CHUDIVÁNI, J. – KUJAN, V. – PERNÝ, M. – HÜTTNER, L. – FRIC, R. – ŠÁLY, V. 2014: *Issues of Electromagnetic Design of Synchronous Brushless Motors with Concentrated Winding*. In: Journal EEA – Electrotechnica, Electronica, Automatica. Rumunsko. Vol. 62. No. 2. ISSN 1582-5175. 2014. s. 24-29. Júl 2014. V tlači.
- [20] CHUDIVÁNI, J. – KUJAN, V. – UHRÍK, M. – HÜTTNER, L. 2014: *Comparison of Concentrated and Distributed Winding in Term of the Magnetic Fields*. In: Journal Electrotechnica, Energetica, Electronica. Rumunsko. ISSN 1223-8139.

