

SMERI RAZVOJA ELEKTRIČNIH POGONSKIH MOTORJEV

DEVELOPMENT TRENDS IN ELECTRICAL MOTORS FOR DRIVES

Rastko Fišer¹, Danilo Makuc²

^{1,2}Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

¹ Laboratorij za elektromotorske pogone

² Laboratorij za električne stroje

rastof@fe.uni-lj.si

Prejem rokopisa - received: 2003-01-16; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-03-18

Članek predstavlja današnje stanje in smeri razvoja na področju uporabe električnih pogonskih motorjev. Podan je pregled lastnosti in gibanja cen trdomagnetnih materialov, ki se uporabljajo pri gradnji električnih motorjev. Analiza uporabe električnih motorjev v reguliranih pogonih kaže na intenzivno rast aplikacij s sinhronskimi motorji s trajnimi magneti, saj bolj kot do sedaj prevladujoči enosmerni in asinhronski motorji ustrezajo zahtevam po visokem izkoristku, nizkem nivoju hrupa, majhnih dimenzijah in sprejemljivi ceni. Predstavljene so različne sodobne konstrukcije rotorjev s trajnimi magneti, predvsem z vidika namestitve magnetov v rotorju in načina ustvarjanja navora. Opisan je tudi konkreten primer načrtovanja električnega motorja s trajnimi magneti, ki daje vpogled v posamezne faze razvoja motorja za posebne namene.

Ključne besede: trajni magneti, električni motorji, električni pogoni, izkoristek, optimiranje

This paper gives an overview of the recent technology and the trends in motors for electrical drives. A review of permanent-magnet materials and the cost trends of their market are discussed. An analysis of the adjustable-speed-drive world market has shown that industrial and civil applications have a tendency to move from general-purpose motors to application-oriented motors with features like high efficiency, low noise, small size, and low cost. The permanent-magnet synchronous motor has come to be used as a motor that satisfies such demands much better than conventional DC and induction motors. The effects of rotor configurations including the arrangement of permanent magnets and the ratio of magnet and reluctance torque are examined. The presented design procedure of the permanent-magnet motor for special applications gives an example of the evolution from an idea to the final product.

Key words: permanent magnets, electric motors, electrical drives, efficiency, optimisation

1 UVOD

Vedno večja skrb za zaščito okolja zahteva tudi energijsko varčne električne naprave. V razvitih državah pomeni npr. delež klimatskih in hladilnih naprav več kot 40 % porabe električne energije v gospodinjstvih, zato postaja uporaba pogonskih motorjev z visokim izkoristkom pomembna tudi na področju izdelkov široke porabe in majhnih moči¹. Poleg energijske varčnosti so osnovne zahteve za motorje tudi robustna konstrukcija, ki ne zahteva vzdrževanja, visoka gostota moči (majhne dimenzije) in sprejemljiva cena. Motorji, ki najbolj ustrezajo tem zahtevam so sinhronski s trajnimi magneti (SMTM, angl. permanent magnet synchronous motor, PMSM).

Za domače industrijske proizvajalce so bolj kot visoko specializirani izdelki majhnih serij in velikih moči zanimivi predvsem izdelki široke porabe majhnih moči (to je več kot 95 % skupne količine vgrajenih trdo- in mehkomagnetnih materialov v električne naprave). Tudi v tem segmentu trga v zadnjem času prevladuje usmerjenost, da se namesto navadnih, že uveljavljenih tipov motorjev (angl. general-purpose motors), v električne naprave vgrajuje posebej prilagojene motorje (angl. application-oriented motors), ki zagotavljajo

boljše obratovalne lastnosti. Poleg uporabe sodobnih materialov skušajo proizvajalci pogonskih električnih motorjev izboljšati izkoristek tudi s skrbnim načrtovanjem in optimalno konstrukcijo. Le ustrezna kombinacija uporabljenega materiala in znanja vodi k visokokvalitetnim in konkurenčnim izdelkom.

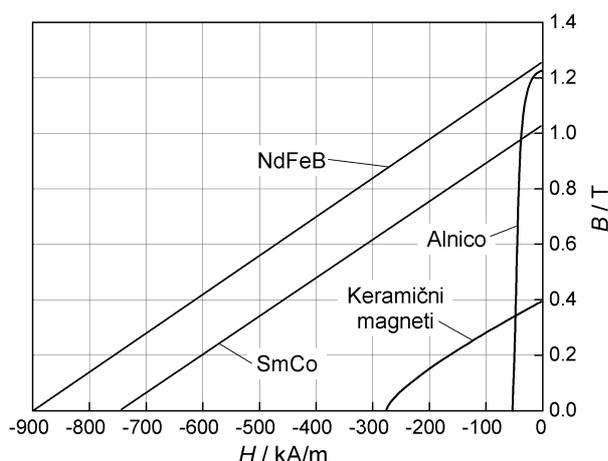
2 LASTNOSTI TRAJNIH MAGNETOV

Glede na kemijsko sestavo uporabljamo pri električnih strojih predvsem naslednje tri vrste trajnih magnetov²:

- magneti Alnico (Al, Ni, Co, Fe)
- keramični (feritni) magneti (npr. barijev ferit /BaO×6Fe₂O₃/)
- magneti redkih zemelj (npr. samarij-kobalt /SmCo/, neodim-železo-bor /NdFeB/)

Razmagnetilne krivulje posameznih vrst magnetov so prikazane na **sliki 1**.

Glavna prednost magnetov Alnico je ta, da imajo zelo visoko remanentno gostoto (B_r) in nizke temperaturne koeficiente ($\sim 0,02$ %/K), največja dopustna temperatura pa je kar 520 °C. Vse naštetu sicer omogoča doseganje razmeroma velikih magnetnih gostot v zračni



Slika 1: Razmagnetilne krivulje različnih vrst trajnih magnetov
Figure 1: Demagnetization curves for different permanent-magnet materials

reži ter visoke delovne temperature, vendar je razmagnetilna krivulja teh magnetov izrazito nelinearna, koercitivna magnetna poljska jakost (H_c) pa je majhna. Zaradi tega je te magnetne ne le lahko namagnetiti, temveč tudi zelo lahko razmagnetiti.

Keramični magneti (feriti) imajo sicer večjo koercitivno poljsko jakost kot magneti Alnico, vendar pa je remanentna magnetna gostota nižja. Temperaturni koeficienti so razmeroma visoki ($\sim 0,20$ %/K), največja dopustna temperatura pa je 400 °C. Glavna prednost teh magnetov je nizka cena in zelo visoka električna upornost, kar pomeni, da so izgube zaradi vrtničnih tokov majhne.

V zadnjih desetletjih je bil dosežen največji napredek na področju magnetov redkih zemelj. Od odkritja v šestdesetih letih, prve uporabe v zgodnjih sedemdesetih letih, pa do danes, so se ti magneti že dodobra utrdili kot trdomagnetni material pri gradnji električnih strojev. Najdlje znano zlitino SmCo_5 odlikuje predvsem visoka remanentna gostota, visoka koercitivna poljska jakost, linearna razmagnetilna krivulja in nizek temperaturni koeficient. Temperaturni koeficient remanentne gostote B_r je od $0,03$ %/K do $0,04$ %/K, temperaturni koeficient H_c od $0,14$ %/K do $0,40$ %/K, največje delovne temperature pa so od 250 °C do 300 °C. Ti magneti so zelo primerni za gradnjo majhnih električnih strojev z visoko gostoto moči in majhnim vztrajnostnim momentom.

Tabela 1: Primerjava lastnosti trdomagnetnih materialov pri sobni temperaturi
Table 1: Comparison of permanent magnets' properties at ambient temperature

Vrsta zlitine	B_r /T	H_c /kA/m	Temperaturni koeficient (%/K)		Najvišja delovna temperatura (°C)
			za B_r	za H_c	
Alnico	$> 1,2$	~ 60	$0,02$		520
Keramični magneti	$< 0,4$	~ 250	$0,20$	$0,27$	400
SmCo	$> 1,0$	~ 250	$\sim 0,03$	$\sim 0,30$	> 250
NdFeB	$> 1,3$	~ 250	$\sim 0,10$	$\sim 0,60$	~ 150

Edina slabost je visoka cena, predvsem zaradi visoke cene surovin, samarija in kobalta.

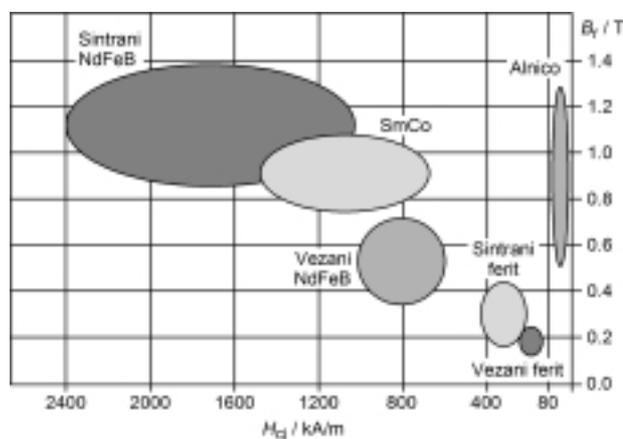
Druga generacija magnetov redkih zemelj je z uporabo poceni materialov, kot sta neodim (Nd) in železo (Fe), v glavnem rešila problem visokih cen osnovnih surovin. Magnetne lastnosti zlitin NdFeB so še boljše od zlitin SmCo, a žal le pri sobni temperaturi. Razmagnetilna krivulja, še posebej koercitivna poljska jakost H_c , je močno temperaturno odvisna. Temperaturni koeficient za B_r je kar od $0,095$ %/K do $0,15$ %/K, za H_c pa od $0,40$ %/K do $0,70$ %/K. Najvišja delovna temperatura je 150 °C. Najnovejši NdFeB magneti imajo sicer boljše temperaturno stabilnost, kar omogoča dvig delovne temperature za približno 50 °C. Slabost NdFeB materialov je tudi izpostavljenost koroziji, zato je nujno potrebna zaščita pred zunanji vplivi.

Značilne lastnosti trdomagnetnih materialov so prikazane tudi v tabeli 1.

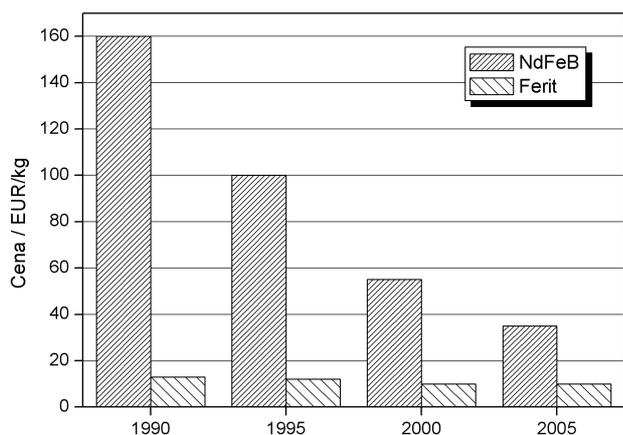
3 STANJE NA SVETOVNEM TRGU ELEKTRIČNIH MOTORJEV

3.1 Razvoj trdomagnetnih materialov

Dostopnost trajnih magnetov iz redkih zemelj je omogočila bistveno povečanje gostote moči pri gradnji električnih strojev (slika 2), posebej s pojavom materiala NdFeB pa se niža tudi cena teh materialov. Cena feritnih materialov ostaja zadnja leta konstantna, vendar ob stalnem izboljševanju njihovih karakteristik (slika 3)^{3,4}.



Slika 2: Sodobni trdomagnetni materiali
Figure 2: Map of modern PM materials

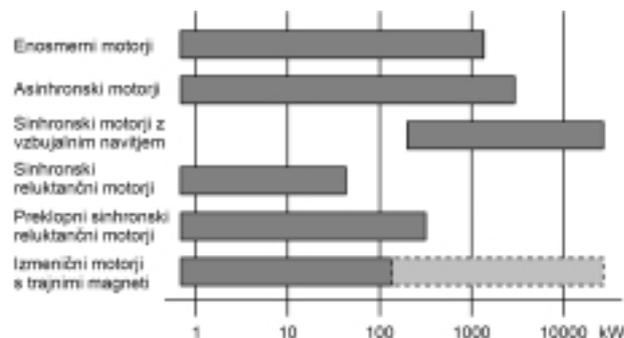


Slika 3: Svetovne cene materialov trajnih magnetov v letih od 1990 do 2005

Figure 3: Cost trends of PM materials in the period from 1990 to 2005

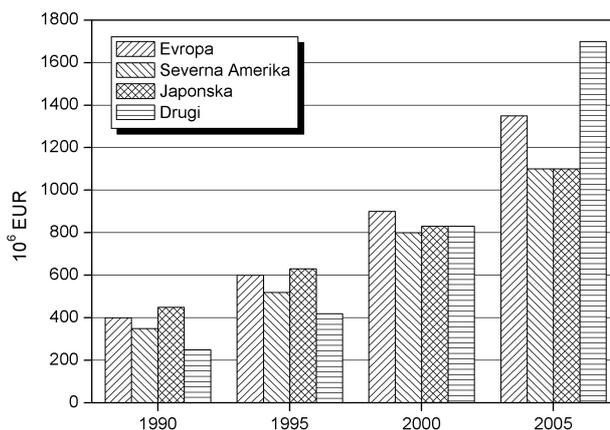
3.2 Trg reguliranih pogonov

Slika 4 prikazuje prevladujočo smer uporabe različnih tipov električnih pogonskih motorjev v reguliranih pogonih. Enosmerni motorji (z vzbujalnim navitjem ali s trajnimi magneti) so še vedno razširjeni predvsem v območju majhnih in srednjih moči. Konkurenčnost tovrstnih pogonov zagotavljajo enostavne napajalne naprave, ki omogočajo ceneno eno ali večkvadrantno obratovanje. Asinhronski motorji so nenadomestljivi v težkih obratovalnih razmerah (mlini, električna vleka, ...), kjer se zahteva tudi velika kratkotrajna preobremenljivost. Sinhronski motorji s klasičnim vzbujalnim navitjem pokrivajo področje največje obratovalne moči. Reluktančni motorji (sinhronski in preklopni) so konkurenčni v področju nižjih navorov. Najbolj intenzivno osvajanje tržišča pa najdemo pri izmeničnih motorjih s trajnimi magneti. Že sedaj so močno zastopani na področju majhnih in srednjih moči, predvideva pa se velika rast in prodor tudi v območje velikih moči (npr. ladijski pogoni). Kot nakazujejo smeri razvoja, naj bi z večanjem mehanske trdnosti, višanjem dopustne temperature in nižanjem cene magnetov redkih zemelj postal sinhronski motor s trajnimi magneti (SMTM) najbolj vsestransko uporabljan tip motorja, ki se bo vgrajeval v



Slika 4: Uporaba motorjev v reguliranih pogonih

Figure 4: Map of the motors used in variable-speed drives



Slika 5: Svetovni trg reguliranih pogonov

Figure 5: Adjustable-speed-drive world market

pogone, kjer so imeli do sedaj glavno vlogo enosmerni oziroma asinhronski motorji. Njegove prednosti so predvsem visok izkoristek, manjše segrevanje in manjše dimenzije za enako moč, pa tudi fleksibilnost pri načrtovanju in vodenju.

Trg reguliranih pogonov je v silnem porastu in se podvoji približno vsakih osem let³. V Evropi ugotavljamo enakomerno rast, v ZDA in na Japonskem pa se v zadnjih letih umirja, saj je v teh dveh tehnološko najrazvitejših regijah trg že delno nasičen. Največja rast (eksponencialna) pa je v deželah v razvoju (**slika 5**). Na Kitajskem se število instaliranih reguliranih pogonov podvoji vsakih pet let - leta 1995 je bil trg izmeničnih pogonov 260 milijonov EUR, leta 2005 se predvideva preko 1000 milijonov EUR. Za primerjavo naj rabi podatke, da je trg enosmernih pogonov konstanten že od leta 1995 in je med približno 70 in 80 milijoni EUR na leto.

4 SMERI PRI KONSTRUKCIJI ROTORJEV S TRAJNIMI MAGNETI

Z ozirom na prevladujočo smer uporabe izmeničnih pogonskih motorjev v zadnjem času poteka najintenzivnejši razvoj izmeničnih motorjev, ki v svoji konstrukciji vsebujejo tudi trdomagnetne materiale. Te navadno uporabimo v rotorju za vzbujanje magnetnega polja, s čimer se izognemo drsnim kontaktom rotorskega vzbujalnega navitja klasičnih sinhronskih motorjev. Vrsti bremen v industriji (visoko zmogljivi kompresorji, turbine, hitro vrteči se generatorji, obdelovalni stroji, medicinska oprema, akumulatorji energije z magnetnimi ležaji, ...) ustreza ravno obratovalna karakteristika sinhronskega motorja, izpolnjevanje zahtev po majhnem volumnu in masi ter visokem izkoristku pogonskega stroja pa še dodatno prispeva k njegovi uveljavitvi.

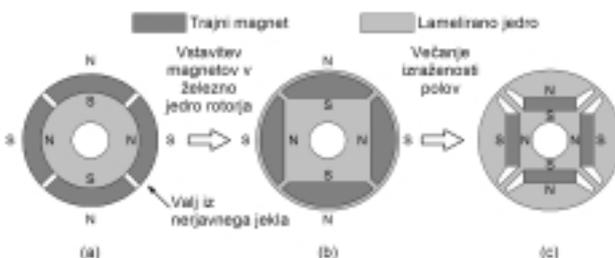
4.1 Namestitvev trajnih magnetov v rotor

Slika 6 prikazuje smeri konfiguracije rotorjev sinhronskih motorjev s trajnimi magneti (SMTM, angl.

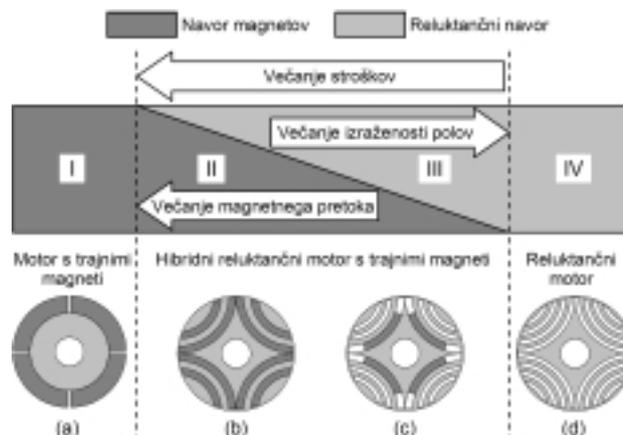
permanent magnet synchronous motor, PMSM). Najenostavnejša za tehnološko izdelavo je konstrukcija rotorja sinhronskega motorja s trajnimi magneti na površini (SMTMP, angl. surface permanent magnet synchronous motor, SPMSM). Trajni magneti polkrožne oblike so nalepljeni na obod rotorskega lameliranega železnega jedra. Mehansko jih učvrstimo s tankim valjem iz nerjavne jeklene pločevine (električno prevoden in nemagneten material z veliko mehansko trdnostjo), ki preprečuje izlet magnetov zaradi centrifugalnih sil. Žal ta valj poveča zračno režo in s tem upornost magnetne poti, v njem pa se inducirajo tudi vrtilni toki, kar poveča segrevanje in zmanjšuje izkoristek motorja (slika 6a)!

Mehansko trdnost pri visokih vrtilnih hitrostih lahko izboljšamo, če trajne magnetne ne lepimo površinsko, temveč jih namestimo pod površino rotorskega mehko-magnetnega materiala. Dobimo sinhronski motor s trajnimi magneti v notranjosti (SMTMN, angl. interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM). Površina rotorja ob zračni reži je sedaj lamelirana, vrtilni toki se močno zmanjšajo, kar ugodno vpliva na izkoristek (slika 6b). Vendar taka sprememba konstrukcije rotorja še ni optimalna. Zaradi reakcije indukta prihaja v tem delu feromagnetnega materiala do nasičenja in povečanega stresa magnetnega polja. Prav tako je izraženost magnetne poti še majhna, zato je reluktančna komponenta navora majhen delež celotnega navora.

Če želimo povečati navor motorja, moramo povečati magnetni pretok trajnih magnetov in/ali tok v navitju. Večji tok pomeni tudi večje jouske izgube v navitju, kar zmanjša izkoristek motorja. Povečan magnetni pretok dosežemo z vgradnjo večje količine trajnih magnetov ali z uporabo magnetov z večjo gostoto magnetne energije, kar oboje vodi k povečanju stroškov izdelave motorja. Na voljo pa imamo še eno možnost povečanja navora motorja pri enakem toku in enaki ali celo manjši količini vgrajenih trajnih magnetov - s posebnim oblikovanjem rotorskih lamel poudarimo izraženost magnetnega kroga v določeni smeri (d - in q -osi) in dobimo dodatni reluktančni navor (slika 6c). Tako dobimo optimalno konstrukcijo rotorja SMTM v smislu doseganja maksimalnega navora ob minimizaciji obratovalnih stroškov in stroškov vgrajenega materiala.



Slika 6: Konstrukcije rotorjev sinhronskih motorjev s trajnimi magneti
 Figure 6: Several rotor configurations of PMSMs



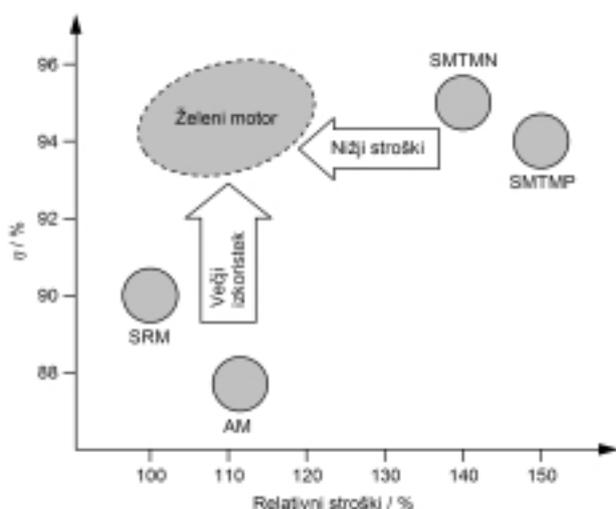
Slika 7: Razmerje navorov različnih konstrukcij sinhronskih motorjev
 Figure 7: Ratio of magnet torque and reluctance torque for several synchronous motors

Feritni trdomagnetni materiali so cenovno zelo ugodni, vendar so za doseg visokega navora pri SMTMN motorjih zaradi nizke B_r neprimerni, saj zavzamejo velik delež volumna rotorja in ostane premalo možnosti za oblikovanje rotorskih lamel s poudarjeno reluktanco (trajni magneti z relativno permeabilnostjo $\mu_r \approx 1$ imajo magnetno reluktanco enako kot zrak). Za visoko zmogljive SMTMN motorje pridejo v poštev praktično le magneti redkih zemelj, ki imajo približno 10-krat večjo gostoto magnetne energije kot feritni trajni magneti. S tem postane potreben volumen magnetov bistveno manjši in pri načrtovanju imamo več možnosti pri njihovem nameščanju v rotorski lameli.

4.2 Hibridna konstrukcija rotora

Na sliki 7 je prikazan odnos med navorom magnetov in reluktančnim navorom pri različnih konstrukcijah rotorjev SMTM, ki so bili predstavljeni že na sliki 6. Območje I je čisti SMTMP; ves navor prispevajo površinsko postavljeni trajni magneti. V območju II imamo SMTMN konstrukcije rotorjev z manj izraženo reluktanco in več vgrajenega trdomagnetnega materiala, v območju III pa konstrukcije rotorjev z bolj izraženo reluktanco in manj vgrajenega trdomagnetnega materiala. Temu ustrezen je tudi delež obeh komponent navorov v skupnem navoru, ki ga motor razvije. V območju IV uvrščamo čisti reluktančni motor, katerega rotor ne vsebuje trdomagnetnega materiala, ves navor motorja pa je posledica različnih reluktanc magnetnih poti v d - in q -osi.

Konkurenčni boj na svetovnem trgu sili proizvajalce električnih motorjev v razvoj visokospecializiranih izdelkov tudi na področju naprav široke porabe, kjer je bila do pred nekaj leti najpomembnejša zahteva le čim nižja cena. Slika 8 prikazuje medsebojno odvisnost med izkoristkom in stroški materiala za različne tipe kompresorskih motorjev v klimatskih napravah. Motorji morajo biti majhni, tihi, ceneni in glede na veliko



Slika 8: Relacija med izkoristkom η in ceno materiala različnih tipov motorjev za kompresorje

Figure 8: Material cost ratio as a percentage of the cheapest synchronous reluctance motor

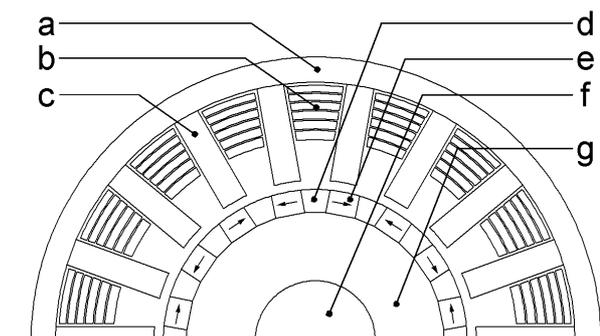
instalirano skupno moč predvsem energijsko varčni. Najcenejši je sinhronski reluktančni motor (SRM), nekaj dražji je zaradi zahtevnejše izdelave rotorja asinhronski motor (AM). Obe izvedbi sinhronskega motorja s trajnimi magneti (SMTMN in SMTMP) se zaradi vgrajenega dragega materiala močno cenovno odmikata, vendar so kasneje obratovalni stroški zaradi višjega izkoristka manjši.

Na **sliki 8** je jasno razvidno, da izbira optimalnega motorja glede na prednostne parametre zahteva kompromis med ceno in izkoristkom. Sedaj velja kot najbolj optimalna izbira SMTMN z izraženim reluktančnim navorom, ki zniža strošek vgradnje materialov redkih zemelj, ohrani pa izkoristek okrog 94 %. Zaradi vse strožjih predpisov o energijski varčnosti in omejevanju hrupa se v razvitih državah ta motor vse bolj uporablja kot standardna rešitev tudi v gospodinjstvih napravah (klimatske naprave, hladilne naprave, pralni in pomivalni stroji, ...). Zaradi tega se v zadnjem času letna poraba energije teh naprav zmanjšuje, čeprav število naprav nenehno narašča¹.

5 PRIMER NAČRTOVANJA MOTORJA S TRAJNIMI MAGNETI

5.1 Splošno o motorju za uporabo v zobnem vrtilnem stroju

Primer uporabe sodobnih magnetnih materialov pri načrtovanju visoko specializiranega motorja (application-oriented motor) je podan na primeru pogonskega motorja zobnega vrtilnega stroja⁵. Zahteve za motor so bile razmeroma visoke. Predvsem zelo majhne dimenzije (premer 20 mm, dolžina 60 mm) in visoka hitrost vrtenja (80000 r/min) so vplivali na izbiro konstrukcije in materialov. Izbrali smo konstrukcijo motorja s trajnimi



Slika 9: Konstrukcija motorja: a-statorski jarem, b-navitje, c-statorski zob, d-železni pol, e-trajni magnet, f-gred, g-aluminij

Figure 9: Motor construction: a-stator yoke, b-winding, c-stator tooth, d-iron pole, e-permanent magnet, f-shaft, g-aluminum

magneti na rotorju in trifazno izvedbo navitja na statorju. Vernierov princip delovanja pa je omogočil doseg zahtevanega navora (0,015 Nm). Nazivna moč tako majhnega motorja je torej kar 125 W.

5.2 Konstrukcija in materiali rotorja

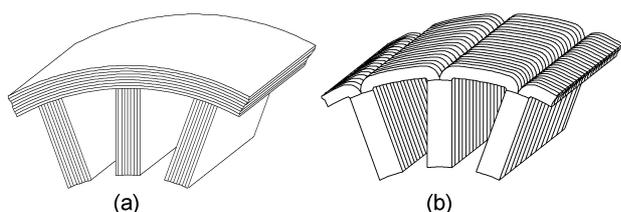
Pri konstruiranju rotorjev s trajnimi magneti ima pomembno vlogo izbira rotorske konfiguracije, to je razporeditev magnetov in drugih sestavnih delov rotorja. Pri omenjenem motorju smo kot najustrenejšo izbrali konstrukcijo rotorja z vgreznjenimi magneti (**slika 9**). Le-ta omogoča doseganje magnetnih gostot, ki so večje od remanentne gostote magneta, istočasno pa je magnet relativno dobro zaščiten pred razmagnetanjem od statorskega magnetnega polja.

Na izbiro vrste trajnega magneta so vplivale predvsem naslednje zahtevane lastnosti:

- čim večja remanentna gostota ($B_r > 1$ T)
- čim večji maksimalni energijski produkt
- termična stabilnost in
- č) majhna občutljivost za razmagnetanje

Nizka B_r je izločila feritne (keramične) magnete, majhen energijski produkt magnetov Alnico pa onemogoča miniaturizacijo. Tako so kot optimalna izbira preostali le magneti redkih zemelj. Ker smo problem razmagnetanja delno rešili že z ustrezno izbiro rotorske konfiguracije, je le zahteva po visoki temperaturi odločila v prid magnetov na osnovi zlitine $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, saj naj bi se za steriliziranje celotnega vrtilnega stroja smelo uporabiti avtoklav. Cenejši in s stališča magnetnih lastnosti boljši so magneti na osnovi zlitin NdFeB, a žal le pri sobni temperaturi, saj so izredno termično nestabilni (temperaturni koeficienti za B_r so razreda -0,1 %/K), poleg tega pa ima večina teh magnetov pri temperaturah, višjih od 100 °C, nepovratne izgube magnetnih lastnosti.

Slabost magnetov iz zlitin SmCo je izredna krhkost, ki povzroča težave pri obdelavi. Zlitine NdFeB z mehanskimi lastnostmi trdih jekel so s tega stališča ugodnejše, vendar smo izbrali magnete Vacomax 255 HR proizva-



Slika 10: Različni izvedbi laminacije statorskega železnega paketa
Figure 10: Different types of lamination of the stator core

jalca Vacuumschmelze, katerih krhkost je še omogočala ustrezno obdelavo pri izdelavi prototipov. Rotorski poli so izdelani iz masivnega čistega železa, saj so računalniške simulacije in izračuni pokazali, da so izgube zaradi vrtničnih tokov v njih zanemarljive.

5.3 Izbira materiala za statorsko železno jedro

Nemalo težav smo imeli pri izbiri materiala za statorsko železno jedro. Nazivna napajalna frekvenca motorja pri 80000 r/min je 10,7 kHz, kar pri električnih strojih že povzroči resne težave zaradi velikih izgub v železnem jedru. Poleg tega je konstrukcija navitja zahtevala nekoliko neobičajno gradnjo statorskega jedra, saj statorski zobje in jarm niso mogli biti izdelani iz enega kosa. Navitja se namreč v utor ne da vstaviti skozi utorsko odprtino na strani rotorja, temveč ga montiramo z zunanje strani in se jarem pritrdi šele na koncu.

Prvi prototip je imel statorsko jedro izdelano iz lamelirane feromagnetne pločevine debeline 0,05 mm (**slika 10a**). Zavedali smo se, da smer laminacije ni najboljša, a smo v danem trenutku in pri tako majhnih dimenzijah ostali pri taki tehnološki rešitvi. Žal je bilo segrevanje motorja premočno, kar je očitno pomenilo, da so izgube v stroju velike. Ker so bile izgube velike tudi v praznem teku, smo sklepali, da so glavni vzrok izgube v železu in da izbira feromagnetnega materiala oziroma izvedba statorskega paketa ni bila primerna. Zaradi tega se je porodila ideja, da bi namesto lamelirane pločevine za izdelavo statorskega jedra uporabili feritni material, kar je nekoliko nenavadno pri gradnji električnih strojev.

Izračuni so pokazali, da bi bil kljub feritnemu materialu navor motorja kar nekajkrat večji od zahtevanega, zato je bila izbira ferita kot magnetnega materiala za statorski paket lažja. Zavedali smo se, da doseže feritni material nasičenje pri dosti nižji magnetni gostoti ($\approx 0,45$ T), a rezerva v navoru in izredno nizke specifične izgube v železu so dajale upanje, da bo taka konstrukcija uspešnejša. Tudi izdelava statorskih zob in jarma je bila enostavnejša, saj smo jih v ustrezni obliki enostavno izrezali iz večjega kosa ferita. Konstrukcija statorskega paketa je bila dejansko enaka tisti s **slike 9**. Meritve so le potrdile uspešnost take konstrukcije, zmanjševanje dimenzij motorja pa bi dosegli le s povečanjem magnetne gostote v zračni reži, to pa pomeni uporabo materialov z višjo magnetno gostoto nasičenja.

Pri zadnjem prototipu smo uspešno rešili tehnološko izdelavo lameliranega jedra, ki je prikazano na **sliki 10b**, ter tako omogočili uporabo feromagnetne pločevine, pri kateri ne bo velikih izgub zaradi neprimerne smeri laminacije. Ustrezne in boljše magnetne lastnosti kot ferit daje uporabljeni amorfni material Vitrovac 6030 F (debelina 0,05 mm). Za primerjavo so v **tabeli 2** zbrani podatki feritnega materiala N 27 in pločevine Vitrovac 6030 F, ki smo ju uporabili pri izdelavi prototipov motorja.

Tabela 2: Primerjava lastnosti feritnega materiala Siemens N27 in feromagnetne pločevine Vitrovac 6030 F

Table 2: Comparison of the properties of Siemens N27 ferrite material and Vitrovac 6030 F

	Siemens N27	Vitrovac 6030 F
Mag. gostota nasičenja	0.45 T	0.82 T
Relativna permeabilnost	2000	3500
Specifične izgube (pri 0,3 T in 10 kHz)	25 mW/cm ³	11 mW/cm ³
Magnetostrikcija	?	$< 0,2 \times 10^{-6}$

6 SKLEP

Posledica intenzivnega razvoja mehko- in trdomagnetnih materialov so tudi nove konstrukcije električnih motorjev, ki jih ti izboljšani materiali omogočajo. Tako se je razmeroma hitro tudi na področju izdelkov široke porabe in nižjega cenovnega razreda uveljavila smer, da se navadne, že uveljavljene tipe motorjev v električnih napravah nadomesti s posebej prilagojenimi motorji, ki zagotavljajo boljše obratovalne lastnosti.

Naraščajočim zahtevam po visokem izkoristku, veliki gostoti moči, majhnem hrupu, energijski varčnosti in majhnih dimenzijah sedaj najbolj ustrezajo sinhronski motorji s trajnimi magneti. Omogočena je tudi dokajšnja svoboda pri načrtovanju in vodenju, kar je pomembno pri vgradnji v naprave s posebnimi zahtevami. Osvajanje trga na področju reguliranih pogonov pa bo postopoma z velikoserijsko proizvodnjo znižalo tudi sedaj še dokaj visoko ceno teh motorjev.

7 LITERATURA

- ¹ S. Morimoto, Y. Takeda, H. Murakami: Motors for Home Applications - Development of Environment-Friendly Electric Motors, Proc. of the 10th Inter. EPE-PEMC Conference, Cavtat&Dubrovnik, Croatia, 2002, 131
- ² J. Gieras, M. Wing, Permanent Magnet Motor Technology - Design and Applications, M. Dekker, New York 1997, 42
- ³ S. Bolognani, N. Bianchi, M. Ziglioto: Electric Motors for the Growth in the Drive Applications, Proc. of the 10th Inter. EPE-PEMC Conference, Cavtat&Dubrovnik, Croatia, 2002, 129
- ⁴ P. Jansson: Application of Soft Magnetic Composite Materials to Electric Motors, Proc. of the 10th Inter. EPE-PEMC Conference, Cavtat&Dubrovnik, Croatia, 2002, 133
- ⁵ D. Makuc, Three-phase high speed permanent magnet motor, Master thesis (in Slovene language), Faculty of Electrical Engineering, Ljubljana 2002