ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK 90(1-2): 9-15, 2023
PREGLEDNI ZNANSTVENI ČLANEK

Sinhronski električni motorji z aksialnim magnetnim pretokom

Mario Vukotić, Urban Rupnik, Roman Manko, Damijan Miljavec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: mario.vukotic@fe.uni-lj.si

Povzetek. V članku je predstavljen pregled različnih modernih oblik sinhronskih električnih motorjev z aksialnim magnetnim pretokom in trajnimi magneti na rotorju. Poudarek je na dvostranskih oblikah TORUS koncepta aksialnih motorjev z utori na statorskem jedru. Predstavljena sta pripadajoča tipa statorskega navitja (koncentrirano in porazdeljeno), ki imata oba kratke glave. Nadalje so obravnavani rotorski trajni magneti, ki so lahko oblikovani na različne načine, segmentirani in zlepljeni skupaj, namagneteni po vzorcu Halbachove mreže ali s spreminjajočo se debelino. Na koncu je narejena primerjava med motorji, ki so dostopni na trgu, glede na njihove javno objavljene tehnične in obratovalne lastnosti.

Ključne besede: aksialni električni motorji, aksialni magnetni pretok, oblika, sinhronski električni motor, navitje, trajni magneti

Axial-flux synchronous electric motors

The paper overviews modern axial-flux permanent-magnet synchronous electric motor designs with a particular emphasis on the double-sided TORUS design with a slotted stator core. The concentrated and distributed stator windings with short end-winding lengths are presented. Differently shaped rotor permanent magnets are discussed. They are either shaped in different ways, segmented and glued together, magnetized according to the Halbach array or of a variable thickness. A comparison is made between the market available motors, according to their technical properties.

Keywords: axial-flux electric motor, axial magnetic flux, design, synchronous electric motor, winding, permanent magnet

1 UVOD

Sinhronski električni motorji so z razvojem močnostne elektronike ter množično proizvodnjo visokoenergijskih trajnih magnetov iz cenovno dostopnejših redkih zemelj (neodim v magnetih NdFeB namesto samarija v magnetih SmCo) v zadnjih desetletjih dobili pomembno mesto v reguliranih električnih pogonskih sistemih s spremenljivo hitrostjo vrtenja [1], [2]. Visoka remanentna gostota magnetnega pretoka omogoča visoko stopnjo magnetenja motorja ob zmanjšani količini magnetov, visoka koercitivna magnetna poljska jakost pa zagotavlja odpornost proti demagnetizaciji. Zaradi teh lastnosti imajo sinhronski motorji s trajnimi magneti iz redkih zemelj zelo kompaktne oblike, pri obratovanju pa dosegajo visoke energijske izkoristke [3], [4].

Glede na prevladujočo smer glavnega magnetnega pretoka delimo sinhronske motorje na radialne in aksialne. Izjema so motorji s prečnim magnetnim pretokom (angl. *transverse flux motors*), kjer magnetni pretok poteka tako v radialni kot aksialni smeri [5]. Pri radialnih motorjih se magnetni pretok sklepa prek zračne reže med statorjem in rotorjem v radialni smeri, pri čemer ima zračna reža obliko plašča valja. Pri sinhronskih motorjih z aksialnim magnetnim pretokom pa je smer magnetnega pretoka v zračni reži vzporedna z osjo vrtenja, tako da ima zračna reža obliko kolobarja. Zaradi oblike zračne reže so oblike motorjev z radialnim magnetnim pretokom bolj podobne valju oz. *bobnu*, medtem ko so aksialne bolj podobne *disku* [6]. Med sinhronskimi električnimi motorji z aksialnim magnetnim pretokom so najbolj razširjeni tisti s trajnimi magneti na rotorju (angl. *Axial-flux permanent magnet electric machine*, AFPM) [6]. Glavna prednost AFPM v primerjavi z radialnim motorjem je gostota moči, tj. razmerje med mehansko močjo na gredi in celotno maso motorja (v [kW/kg]), pri čemer se ohranja visok energijski izkoristek v širokem področju delovanja [6], [7]. Izzivi, s katerimi se srečujejo in jih rešujejo proizvajalci teh motorjev, pa so tako tehnične kot tudi ekonomske narave (zadostno odvajanje izgubne toplote iz motorja, ohranjanje konstantne širine zračne reže, dražja proizvodnja, višja stopnja možne demagnetizacije, možnost nastanka velikih aksialnih sil zaradi magnetnih asimetrij …), zaradi česar se postopki oblikovanja in proizvodnje AFPM še vedno razvijajo [8]. Glede na potrebe električnih pogonov so bile do zdaj razvite izvedbe AFPM z različnimi tipi statorjev z navitjem ter rotorjev s trajnimi magneti, npr. Vernierjev tip AFPM-ja, motor s preklapljanjem magnetnega pretoka (angl. *flux-switching motor*) idr. [7] V članku bomo obravnavali sinhronske AFPM s konstantnim magnetnim vzbujanjem (trajni magneti) na rotorju, kjer imata stator in rotor enako število magnetnih polov.

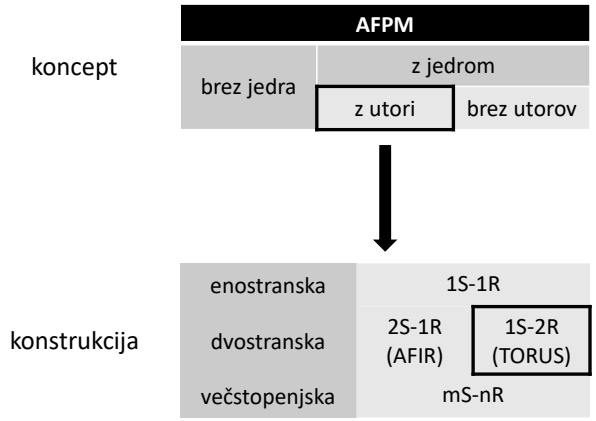
Prejet 23. januar, 2023
Odobren 1. marec, 2023

2 KLASIFIKACIJA IZVEDB MOTORJEV AFPM

2.1 Splošna delitev

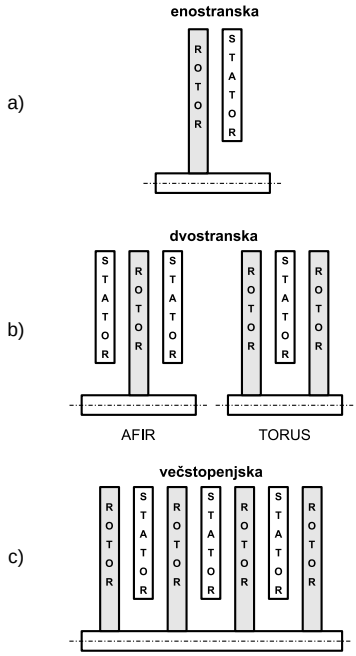
Izvedbe AFPM (slika 1) delimo glede na različne koncepte in oblike. Koncepte delimo na tiste brez statorskega jedra (angl. *coreless*) in tiste z jedrom. Slednje delimo naprej na koncepte z jedrom, ki imajo statorske utore (angl. *slotted*), in z jedrom brez utorov (angl. *slotless*) [9]. Osredotočili se bomo na koncepte s statorskim jedrom z utori, pri katerih je zaradi majhne zračne reže za magnetenje potrebna tudi manjša količina trajnih magnetov. Sami magneti pa so zaradi geografsko omejene proizvodnje in posledično potencialnih motenj v dobavi in/ali visokih cen ključna komponenta v AFPM.

Pri vseh konceptih so možne tri oblike (slika 1, spodaj): (a) enostranska z enim statorjem in enim rotorjem (1S-1R); (b) dvostranska z dvema statorjema in enim rotorjem (2S-1R, angl. *Axial-Flux Inner Rotor*, AFIR) oz. enim statorjem in dvema rotorjema (1S-2R, TORUS); ali (c) večstopenjska, kjer so enostranske oz. dvostranske oblike nanizane v aksialni smeri (slika 2).



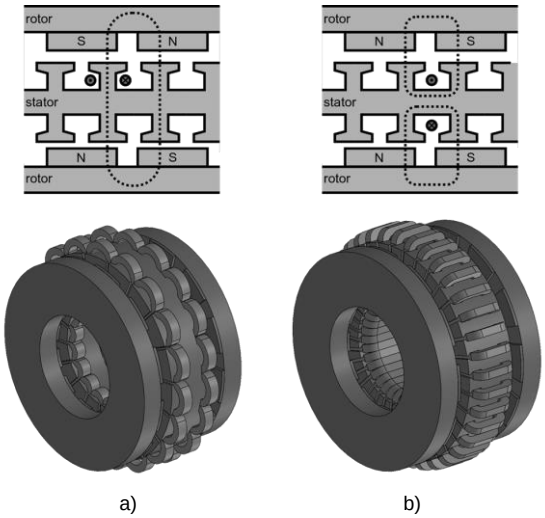
Slika 1: Izvedbe AFPM glede na koncept in obliko.

Glavna prednost dvostranskih oblik AFIR in TORUS v primerjavi z enostranskimi je večja gostota moči [10], ki izhaja iz dvojne površine zračne reže, saj je ta na obeh straneh sredinskega statorja oz. rotorja. S tem pa sta navor in posledično moč dvakrat večja kot pri enostranski obliki, pri čemer je masa celotnega motorja manj kot dvakrat večja. Dodajanje statorjev in rotorjev v aksialni smeri (večstopenjske oblike [11]) ne pripomore k povečanju gostote moči, ker se izhodna moč in masa povečata za enak faktor. Dodatna pomembna prednost dvostranskih oblik je tudi manjša obremenitev ležajev v aksialni smeri, saj je v idealnem primeru skupna sila, ki je vsota dveh po smeri različnih, a po iznosu enakih sil v obeh zračnih režah enaka nič.



Slika 2: a) enostranska, b) dvostranska in c) večstopenjska oblika.

V nadaljevanju se bomo osredotočili le na AFPM oblik TORUS z utori na statorskem jedru. Trajne magnete na rotorskih ploščah je možno pozicionirati v postavitvi NS (slika 3a) ali NN (slika 3b), kar pomeni, da imata dva v aksialni smeri soležna magneta enako (NS) oz. nasprotno polariteto (NN). Pri NS postavitvi magnetov se tuljave navijajo okrog zob, pri NN pa okrog statorskega jarma. Oba načina navijanja sta prikazana na sliki 3 [9], [12]–[14].



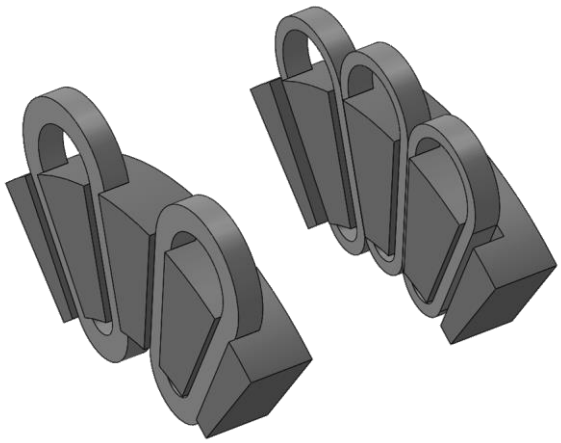
Slika 3: Konstrukciji TORUS s tuljavami okrog: (a) statorskih zob (NS), (b) statorskega jarma (NN).

V obeh primerih gre za kompaktne statorske tuljave, kar pomeni, da so glave navitja, ki predstavljajo delež navitja, ki ne prispeva k pretvorbi energije, kratke. Take glave navitja vodijo do kompaktnejše oblike motorja ter

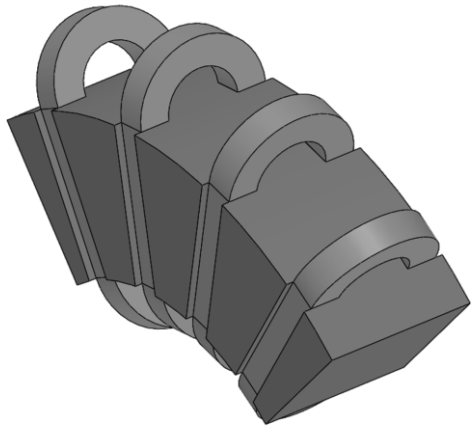
manjših izgub v navitju. Končna dolžina glav navitja je odvisna od širine zoba oz. jarma.

2.2 Statorsko jedro z navitjem

Na statorsko jedro konstrukcije TORUS je možno naviti: (a) koncentrirano navitje (enoslojno ali dvoslojno, slika 4) z ulomljenim številom utorov na pol in fazo, kjer so tuljave navite okrog statorskih zob – NS-postavitev trajnih magnetov na rotorju; ali (b) porazdeljeno navitje (enoslojno, slika 5), najpogosteje s celim številom utorov na pol in fazo – NN-postavitev magnetov. Velja opomniti, da so pri NN-postavitvi v splošnem možna tudi dvoslojna porazdeljena navitja, vendar je praktična vezava nekoliko bolj zapletena. Obenem je pridobitek na bolj sinusni obliki magnetnega polja v zračni reži, ki ga ustvari navitje, zelo majhen. Poleg tega je pri AFPM s površinsko nameščenimi magneti magnetno polje teh večje od polja navitja, zato je tudi doprinos slednjega k skupnemu polju v zračni reži manjši.



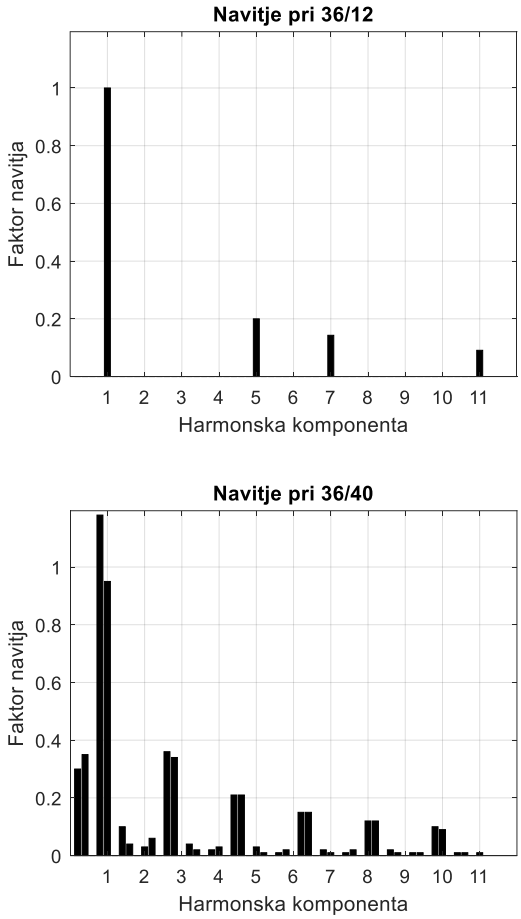
Slika 4: Možnosti navijanja tuljav okrog statorskih zob (NS) – koncentrirano navitje.



Slika 5: Navijanje tuljav okrog statorskega jarma (NN) – porazdeljeno navitje.

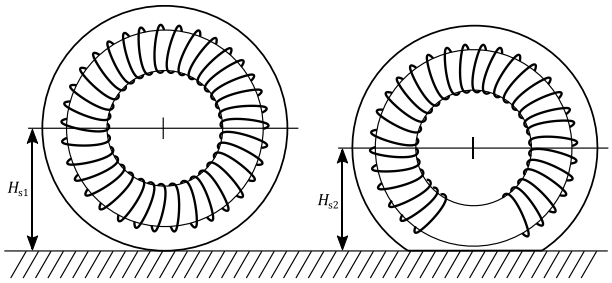
Tip navitja vpliva na obliko magnetnega polja v zračni reži (slika 6). Pri porazdeljenem navitju s tuljavami okrog statorskega jedra (NN) vsebuje spekter magnetnega polja navitja lihe višje harmonske komponente reda $k \pm 1$ (navitje s 36 statorskimi utori in 12 magnetnimi poli na sliki 6), kjer je $k = 6n$ in je n naravno število, ki povzročajo pulzacije navora $6n$-krat višjimi frekvencami od osnovne (sinhronske) frekvence statorskega toka, ki so vidne v spektru navora, kar je značilnost porazdeljenih navitij.

Pri koncentriranem navitju, ki ima tuljave okrog statorskih zob (NS), pa so v spektru prisotne tudi neceloštevilske harmonske komponente [15]. Na sliki 6 (navitje s 36 utori in 40 poli) je red najnižje harmonske komponente 1/5 in je celo manjši od osnovne (subharmonska komponenta). Tako »bogat« spekter z asinhronskimi komponentami, torej tistimi, ki se ne vrtijo sinhrono z glavnim magnetnim poljem, poleg pulzacij navora povzroča tudi nezanemarljive dodatne izgube v trajnih magnetih na rotorju. Ti pa so poleg statorskega navitja še posebej občutljivi na obratovanje pri povišanih temperaturah. Te lahko namreč vodijo do ireverzibilne demagnetizacije tudi pri manjših tokovnih obremenitvah motorja [16].



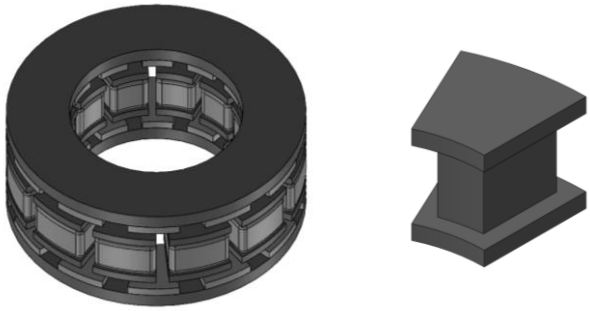
Slika 6: Spekter magnetnega polja navitja v zračni reži.

Kot zanimivost pokažimo še t. i. navitje Ω (slika 7) [17], kjer so avtorji predstavili posebno obliko navitja pri TORUS AFPM, pri katerem del oboda statorskega jedra ni navit, s čimer je pridobljeno nekaj prostora za znižanje osne višine motorja (H_s), kar je bilo v konkretnem pomenu ključnega pomena.



Slika 7: Stator z navitjem Ω (povzeto po [17]).

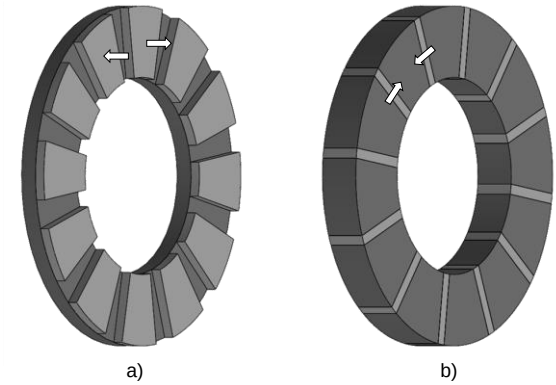
Posebna oblika konstrukcije TORUS z dvoslojnim navitjem s koncentriranimi tuljavami okrog statorskih zob je YASA (angl. *Yokeless And Segmented Armature*, slika 8), ki nima statorskega jarma. Gre za NS-tip konstrukcije TORUS (po sliki 3), kjer se magnetni polji dveh soležnih magnetov na različnih rotorskih ploščah podpirata, zato je potreben le feromagnetni statorski segment, ki ju poveže.



Slika 8: Konstrukcija YASA (levo) z enim statorskim feromagnetnim segmentom (desno).

2.3 Rotor s trajnimi magneti

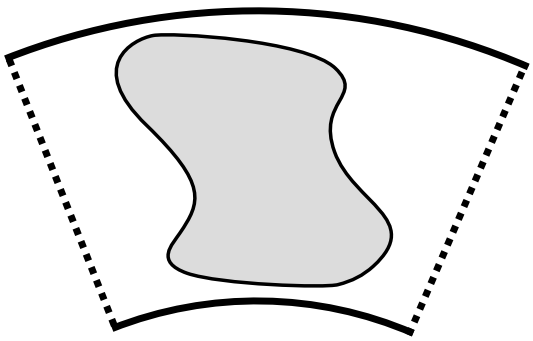
V TORUS AFPM se lahko uporabljata dva tipa rotorjev (slika 9): (a) s površinsko nameščenimi magneti (angl. *Surface Mounted Permanent Magnet*, SMPM); in (b) s potopljenimi magneti (angl. *Interior Permanent Magnet*, IPM). Površinsko nameščeni magneti so namagneteni v smeri glavnega magnetnega pretoka (aksialno, smer *z* v cilindričnem koordinatnem sistemu), medtem ko so potopljeni magneti namagneteni v obodni smeri (tangencialno, smer φ), obrat v aksialno smer proti statorju pa dosežemo z vmesnimi feromagnetnimi poli. IPM-konstrukcija omogoča koncentracijo magnetnega pretoka, zato je še posebej primerna pri uporabi trajnih magnetov z manjšimi gostotami energije, npr. trdomagnetnimi feriti.



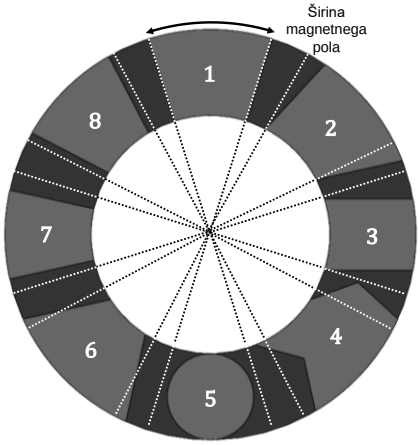
Slika 9: Rotor s: (a) površinsko nameščenimi magneti (SMPM), (b) potopljenimi magneti (IPM).

V prostem teku motorja AFPM, torej ko v statorskem navitju ni toka, pride pri vrtenju do pojava samodržnega navora. To je posledica razlike v shranjeni magnetni energiji (predvsem) v zračni reži pri različnih kotnih pozicijah rotorja. Pri tokovni obremenitvi pa se zaradi interakcije magnetnega polja statorskega navitja, prisotnosti statorskih utorov in polja trajnih magnetov pojavijo še dodatne pulzacije navora. Tako samodržni navor kot tudi dodatne pulzacije navora pri obremenitvi povzročajo hrup, vibracije ter izgube v magnetih. Slednje so posledica pulzacij skupnega polja magnetov in navitja, ki v magnetih inducira vrtinčne toke.

Vse omenjene nezaželene pojave je treba zmanjšati z ustreznimi ukrepi, pri čemer je najenostavnejši ukrep optimizacija oblike magnetov (slika 10). Najpogostejši načini oblikovanja magnetov SMPM-tipa rotorja so prikazane na sliki 11. Pri nekaterih oblikah gre del magneta čez meje svojega geometrijskega področja magnetnega pola, pri čemer pa se za enak delež zmanjša površina na drugi strani pola. S tem pristopom iz spektra magnetnega polja trajnih magnetov izločimo višje harmonske komponente, osnovna komponenta pa se zaradi prekrivanja med magnetnimi poli nekoliko zmanjša.

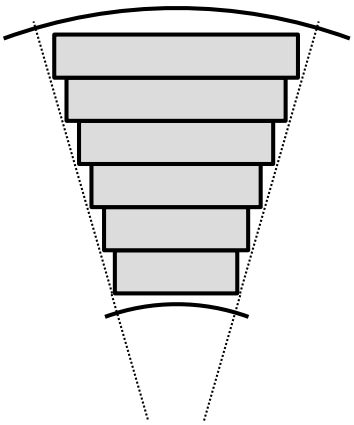


Slika 10: Splošna oblika magneta znotraj razpoložljivega prostora v magnetnem polu.



Slika 11: Nekatere od možnosti oblik magnetov (povzeto po [18]).

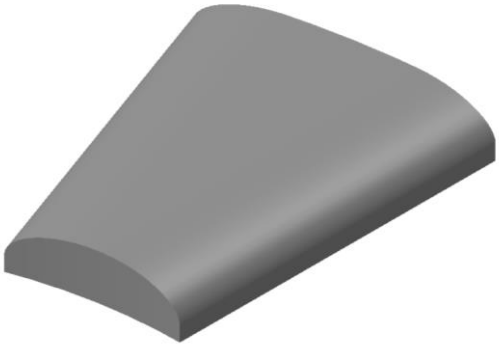
Optimizacija oblike magnetov se lahko izvede tudi s segmentacijo enega magneta na več manjših magnetov v obliki kvadrov različnih dimenzij (slika 12) [19]. Pri tem se zaradi diskretnih elementov nekoliko oddaljimo od optimalne oblike magneta, vendar pridobimo pri dveh zelo pomembnih lastnostih sinhronskega električnega motorja s trajnimi magneti. To sta: (1) prihranek pri ceni magnetov, saj je magnet oblike kvadra najcenejši za izdelavo in z najmanj odpada pri proizvodnji, ter (2) ob predpostavki, da so magneti med seboj električno izolirani, zmanjšanje parazitnih vrtinčnih tokov v magnetu, ki ga segrevajo in lahko vodijo do delne ali popolne demagnetizacije.



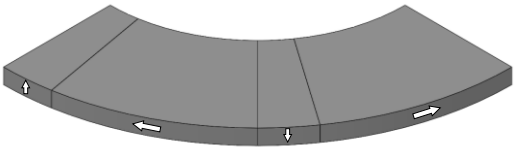
Slika 12: Segmentacija magneta na kvadre (povzeto po [19]).

Obliko magneta je možno optimizirati tudi po debelini, kot je prikazano na sliki 13. Tak magnet je zahtevnejši za izdelavo in zato tudi dražji. Končni učinek je podoben kot pri oblikovanju po širini pola.

Za doseganje želene oblike magnetnega polja v zračni reži, ki ga vzbudijo trajni magneti, lahko uporabimo tudi Halbachovo mrežo (angl. *Halbach array*) [20]. Ta je sestavljena iz magnetnih segmentov, ki so pri najenostavnejši konfiguraciji izmenjujoče se namagneteni v aksialni in obodni smeri (slika 14). Na strani zračne reže je prisotno magnetno polje, medtem ko ga na nasprotni strani skoraj ni (samo razsipano polje), zato tudi ni potrebe po feromagnetnem jarmu. S povečevanjem števila segmentov in smeri magnetizacije (dodatni segmenti z različnimi koti med aksialno in obodno smerjo) postaja oblika magnetnega polja v zračni reži vedno bolj sinusna, na nasprotni strani pola pa je razsipanega polja vedno manj. Proizvodna cena rotorja z bolj kompleksno Halbachovo mrežo pa prav tako naraste.



Slika 13: Variacija debeline magneta na robovih.



Slika 14: Halbachova mreža AFPM-rotorja (povzeto po [20]).

3 PRIMERJAVA

Primerjava lastnosti štirih AFPM, ki so dostopni na trgu, je bila narejena glede na njihove javno objavljene tehnične podatke. Gre za AFPM s površinsko nameščenimi magneti v razredu nazivnih obratovalnih hitrosti do 5000 min^{-1}. To so EVO AF340 [21], Phi301 [22], YASA 750 [23] in EMRAX 348 [24] (tabela 1). EVO AF340 je večstopenjski AFPM (slika 2.c) z dvema zaporednima TORUS-oblikama (iz tehničnega lista [21]: 2 navitji na statorju in 3 rotorji). Phi301 je AFIR tip dvostranskega AFPM z dvema statorjema in sredinskim rotorjem. YASA 750 in EMRAX 348 sta oba AFPM s TORUS-obliko.

Omenjene motorje smo primerjali glede na njihove konstrukcijske parametre, združene v konstanto K (razen zunanjega premera D_{out}), in obratovalne lastnosti, ki so zbrane v tabeli 1. Mehansko moč AFPM izračunamo po enačbah [25]:

$$P = K \cdot n_{\mathrm{s}} \cdot A_{\mathrm{m}} \cdot \eta \cdot D_{\mathrm{out}}^3 \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{16\varepsilon} \pi k_{\mathrm{w1}} \alpha_{\mathrm{i}} B_{\mathrm{mg}} \cos\varphi \, (1 + k_{\mathrm{d}})(1 - k_{\mathrm{d}}^2) \quad (2)$$

kjer so:

P – mehanska moč (trajno) (W)
n_{s} – nazivna vrtilna hitrost (min^{-1})
A_{m} – tokovna obremenitev (A/m)
η – izkoristek (-)
D_{out} – zunanji premer (m)
ε – razmerje med inducirano in priključno napetostjo (-)
k_{w1} – faktor navitja (-)

α_i – faktor magnetnega pola (-)
B_{mg} – gostota magnetnega pretoka v zračni reži (T)
$\cos\varphi$ – faktor delavnosti (m)
k_d – razmerje med notranjim in zunanjim premerom (-)

Parametri, ki niso vključeni v konstanto K (obratovalne lastnosti), so pridobljeni iz tehničnih listov posameznih AFPM in so podani v tabeli 1.

Tabela 1: Obratovalne lastnosti AFPM različnih proizvajalcev.

AFPM	Obratovalne lastnosti
EVO AF340 [21]	P_n/P_{max} = 282/660 kW
122 kg	n_s = 5000 min^{-1}
večstopenjski	η > 95 %
2,3/5,4 kW/kg	D_{out} = 380 mm
Phi301 [22]	P_n/P_{max} = 85/160 kW
29 kg	n_s = 5000 min^{-1}
AFIR	η > 95 %
2,9/5,5 kW/kg	D_{out} = 300 mm
YASA 750 [23]	P_n/P_{max} = 100/200 kW
37 kg	n_s = 3250 min^{-1}
TORUS	η > 95 %
2,7/5,4 kW/kg	D_{out} = 368 mm
EMRAX 348 [24]	P_n/P_{max} = 210/400 kW
44 kg	n_s = 4000 min^{-1}
TORUS	η > 96 %
4,8/9,1 kW/kg	D_{out} = 348 mm

Vrednost vsakega od parametrov v konstanti K (tabela 2) je bila ocenjena glede na njegove tipične vrednosti in razpon [6], [26]. V tem primeru znaša konstanta K = 0,1613 T, ki jo vstavimo v enačbo (1) in s podatki iz tabele 1 izračunamo tokovno obremenitev A_m,upoštevajoč tudi razpon, ki je vsota relativnih razponov iz tabele 2, in znaša ±33,97 %. Pri EVO AF340 smo zaradi večstopenjske konstrukcije (2 × TORUS) pri izračunu tokovne gostote upoštevali le polovično trajno moč (P_n = 141 kW). V tabeli 3 so podane izračunane tokovne obremenitve A_m za posamezne AFPM.

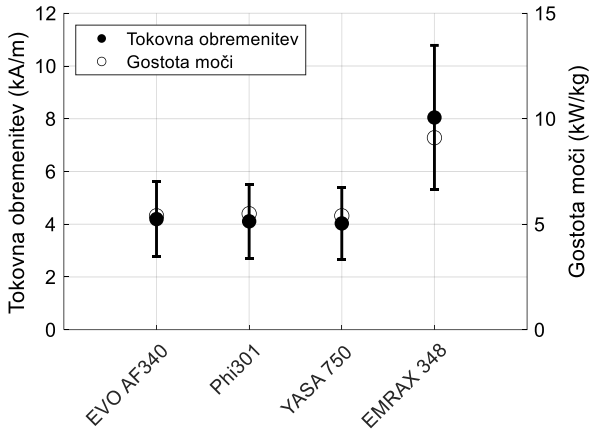
Tabela 2: Izbrane vrednosti parametrov AFPM.

Količina	Ocenjena vrednost	Razpon
ε	0,90	± 0,05
k_{w1}	0,97	± 0,03
α_i	0,90	± 0,05
B_{mg}	0,85 T	± 0,05 T
$\cos\varphi$	0,95	± 0,05
k_d	0,58	± 0,05

Tabela 3: Tokovne obremenitve AFPM.

AFPM	Izračunana tokovna obremenitev
EVO AF340	A_m = 4194 A/m ± 1425 A/m
Phi301	A_m = 4110 A/m ± 1396 A/m
YASA 750	A_m = 4030 A/m ± 1369 A/m
EMRAX 348	A_m = 8047 A/m ± 2734 A/m

Na sliki 15 so na grafu prikazane tokovne obremenitve ter gostote moči za obravnavane AFPM. Glede na graf obstaja korelacija med obema količinama, kar pomeni, da je tokovna obremenitev ključna za doseganje visokih gostot moči, saj se z njo povečuje tudi gostota navora. Omejitev navzgor predstavlja sposobnost odvajanja izgubne toplote iz navitja (hlajenja), zato je za povečanje gostote navora in posledično moči treba izboljšati hlajenje. Iz izračunanih vrednosti lahko sklepamo, da je odvajanje toplote pri AFPM EMRAX 348 mnogo boljše kot pri preostalih treh motorjih.



Slika 15: Vrednosti tokovne obremenitve in gostote moči AFPM pri trajnem obratovanju.

4 ZAKLJUČEK

Članek ponuja pregled nad trenutnim stanjem razvoja sinhronskih električnih motorjev z aksialnim magnetnim pretokom. Glede na smernice lahko pričakujemo, da se bo razvoj teh motorjev v prihodnjih letih še okrepil s poudarkom na še bolj kompaktnih konstrukcijah z visokim energijskim izkoristkom.

Primerjalna analiza je pokazala, da je pravilno termično oblikovanje AFPM ključnega pomena za doseganje visokih vrednosti gostot navora in moči. Z učinkovitejšim odvajanjem izgubne toplote lahko namreč povečamo tokovno obremenitev AFPM in s tem povečamo navor in moč na gredi pri nespremenjeni obliki motorja.

LITERATURA

[1] R. Fišer in D. Makuc, „Smeri razvoja električnih pogonskih motorjev“, Materiali in tehnologije, 37(1), str. 91–96, 2003.

[2] V. Ambrožič in P. Zajec, „Električni servo pogoni“, 1. izdaja, Slovensko združenje elektroenergetikov CIGRÉ-CIRED, Ljubljana, 2016.

[3] D. Miljavec, „D3.10: Report and/or scientific publications on optimization of electrical motor“, https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5db3c0070&appId=PPGMS (19. 1. 2023).

[4] M. Farzam Far, „D1.8: Project final report“, https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5dd8a46e8&appId=PPGMS (19. 1. 2023).

[5] J. Leskovec, D. Makuc, F. Lahajnar in D. Miljavec, „Nonlinear reluctance model of transverse flux motor“, Przeglad elektrotechniczny (Electrical Review), 87(3), str. 111–114, 2011.

[6] J. F. Gieras, R.-J. Wang in M. J. Kamper, „Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines“, 2. izdaja, Springer, Dordrecht, 2008.

[7] R. Huang, Z. Song, H. Zhao in C. Liu, „Overview of Axial-Flux Machines and Modeling Methods“, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8(2), str. 2118–2132, 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3144594.

[8] M. Shokri, N. Rostami, V. Behjat, J. Pyrhönen in M. Rostami, „Comparison of Performance Characteristics of Axial-Flux With Different Magnet Shapes“, IEEE Transactions on Magnetics, 51(12), 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2460217.

[9] L. Shao, R. Navaratne, M. Popescu in G. Liu, „Design and Construction of Axial-Flux Permanent Magnet Motors for Electric Propulsion Applications — A Review“, IEEE Access, 9, str. 158998–159017, 2021, doi: 10.1109/access.2021.3131000.

[10] A. Mahmoudi, H. W. Ping, in N. A. Rahim, „A Comparison between the TORUS and AFIR Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Using Finite Element Analysis“, v 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 15. – 18. maj 2011, Niagara Falls, Ontario, Kanada, str. 242–247.

[11] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, H. W. Ping, in M. N. Uddin, „A Comprehensive Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Machines“, IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 37(1), str. 19–33, 2014, doi: 10.1109/CJECE.2014.2309322.

[12] H. Vansompel, P. Leijnen, in P. Sergeant, „Multiphysics Analysis of a Stator Construction Method in Yokeless and Segmented Armature Axial Flux PM Machines“, IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(1), str. 139–146, 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2862622.

[13] M. Polat, A. Yildiz in R. Akinci, „Performance Analysis and Reduction of Torque Ripple of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor Manufactured for Electric Vehicles“, IEEE Trans. on Magnetics, 57(7), 2021, doi: 10.1109/TMAG.2021.3078648.

[14] Y. Wang, J. Lu, C. Liu, G. Lei, Y. Guo in J. Zhu, „Development of a High-Performance Axial Flux PM Machine With SMC Cores for Electric Vehicle Application“, IEEE Transactions on Magnetics, 55(7), str. 2019–2022, 2019, doi: 10.1109/TMAG.2019.2914493.

[15] M. Harke, „Design of fractional slot windings with coil span of two slots for use in six-phase synchronous machines“, v The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018), 17. – 19. april 2019, Liverpool, Združeno kraljestvo Velike Britanije in Severne Irske, str. 4391–4395. doi: 10.1049/joe.2018.8209.

[16] F. Mahmouditabar, A. Vahedi in P. Ojaghlu, „Investigation of demagnetization phenomenon in novel ring winding AFPM motor with modified algorithm“, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 491, 2019, doi: 10.1016/j.jmmm.2019.165539.

[17] G. De Donato, F. G. Capponi, G. Borocci, F. Caricchi, L. Beneduce, L. Fratelli in A. Tarantino, „Ω-Shaped Axial-Flux Permanent-Magnet Machine for Direct-Drive Applications With Constrained Shaft Height“, IEEE Trans. on Industry Applications, 51(4), str. 3050–3058, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2411659.

[18] M. Aydin in M. Gulec, „Reduction of Cogging Torque in Double-Rotor Axial-Flux Permanent-Magnet Disk Motors : A Review of Cost-Effective Magnet-Skewing Techniques With Experimental Verification“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(9), str. 5025–5034, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2276777.

[19] L. Xiao, J. Li, R. Qu, Y. Lu, R. Zhang in D. Li, „Cogging Torque Analysis and Minimization of Axial Flux PM Machines With Combined Rectangle-Shaped Magnet“, IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2),str.1018–1027, 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2631522

[20] K. Kant in J. L. Kirtley, „Axial Flux Topology Based Control Moment Gyroscope for Integrated Speed and Tilt Control“, IEEE Transactions on Energy Conversion, 36(4), str. 3387–3394, 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3075611.

[21] „DATASHEET EVO Axial Flux Electric Motor AF340 Model“, https://turntide.com/wp-content/uploads/2021/09/AF340-Datasheet_v03TL.pdf (19. 1. 2023).

[22] „Phi301 Series“, https://www.phi-power.com/wp-content/uploads/2018/01/Phi301-Spec_Sheet-V1.2.pdf (19. 1. 2023).

[23] „YASA 750 R Electric Motors Product Sheet“, https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2021/05/YASA-750RDatasheet-Rev-11.pdf (19. 1. 2023).

[24] „EMRAX 348“,https://emrax.com/wp-content/uploads/2022/11/EMRAX_348_datasheet_A00.pdf (19. 1. 2023).

[25] J. Li, Y. Lu, Y. Cho in R. Qu, „Design, Analysis, and Prototyping of a Water-Cooled Axial-Flux Permanent-Magnet Machine for Large-Power Direct-Driven Applications“, IEEE Transactions on Industry Applications, 55(4), str. 3555–3565, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2907890.

[26] J. Pyrhönen, T. Jokinen, in V. Hrabovcová, Design of rotating electric machines, 2. izdaja, John Wiley and Sons, Chichester, Združeno kraljestvo Velike Britanije in Severne Irske, 2008.

Mario Vukotić je zaposlen kot raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Ukvarja se z oblikovanjem in optimizacijo elektromagnetnih pretvornikov energije, pri katerih proučuje različne sklopljene fizikalne pojave (elektromagnetne, termične in mehanske).

Urban Rupnik je zaposlen kot raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Ukvarja se z izdelavo specialnih merilnih in testnih mest, pri čemer proučuje različne elektromagnetne in mehanske lastnosti materialov in elektromagnetnih struktur.

Roman Manko je zaposlen kot mladi raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Ukvarja se z razvojem, oblikovanjem in optimizacijo električnih strojev s spremenljivim območjem delovanja.

Damijan Miljavec je zaposlen kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer vodi Laboratorij za električne stroje. Znanstvenoraziskovalno se ukvarja s posebnimi električnimi stroji, njihovim razvojem in uporabo.