

**UTICAJ KONSTRUKCIJE NA PERFORMANSE SINHRONIH MAŠINA SA STALNIM MAGNETIMA****INFLUENCE OF CONSTRUCTION ON PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES PERFORMANCES**

Milica Marković, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu je napravljen pregled najzastupljenijih tipova konstrukcija sinhronih mašina sa stalnim magnetima (SMSM). Na primeru sinhronog motora sa utisnutim stalnim magnetima, uz primenu metode konačnih elemenata (FEA), izvršen je proračun karakterističnih veličina režima praznog hoda, kao što su talasni oblici indukovanih elektromotornih sila i talasnost parazitivnog momenta (cogging torque). Ustanovljen je uticaj koji širina otvora statorskog žleba ima na razmatrane veličine.

**Ključne reči:** SMSM, FEA, prazan hod, elektromotorna sila, parazitivni momenat.

**Abstract** – The paper presents an overview of the most common types of structures of synchronous machines with permanent magnets (PMSM). On the example of a synchronous motor with interior permanent magnets, using the finite element method (FEA), the characteristic variables of the no-load operation such as the waveforms of induced electromotive forces and the cogging torque were calculated. The influence that the width of the stator slot opening has on the considered variables has been analyzed and discussed.

**Keywords:** PMSM, FEA, no-load operation, electromotive force, cogging torque.

**1. UVOD**

Sinhronne mašine su rotacione električne mašine koje karakteriše obrtno magnetno polje u vazдушnom zazoru, čija sinhrona brzina obrtanja zavisi od frekvencije struja statorskih namotaja. Pojam sinhrona proizilazi iz činjenice da je mehanička brzina obrtanja rotora jednaka brzini obrtnog polja.

Kako bi se ostvarila elektromehanička konverzija uz sinhronu brzinu obrtanja rotora, potrebno je obezbediti da rotorsko magnetno kolo ima sopstveni izvor pobuđivanja. Pobuđivanje se može realizovati pomoću zasebnog pobudnog namotaja kroz koji se uspostavlja jednosmerna struja, ili postavljanjem stalnih magneta na rotoru. Tema ovog rada je analiza performansi sinhronih mašina sa stalnim magnetima kao izvorom pobude, tako da će na dalje biti reči samo o ovoj vrsti mašina.

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, docent.**

Sinhronne mašine sa stalnim magnetima imaju visoku efikasnost, visoku stabilnost obrtnog momenta, malu inerciju i jednostavno upravljanje. Ovaj tip mašina najčešće služi za pogone koji rade u širokom opsegu brzina. Brzine se kreću u opsegu od nekoliko stotina, pa čak i do preko deset hiljada obrtaja u minuti. Neke od najčešćih primena SMSM su: robotski aktuatori, alatne mašine, kućni aparati i električna vozila.

U radu je izvršen pregled najzastupljenijih tipova konstrukcije SMSM, a zatim i analiza uticaja varijacije u konstrukciji na njihove performanse. Naročit naglasak je stavljen na uticaj na talasnost parazitivnog momenta, odnosno talasne oblike indukovanih elektromotornih sila praznog hoda.

Za izvršene analize korišćena je softverska implementacija metode konačnih elemenata. Na primeru SMSM sa utisnutim i poprečno namagnetisanim magnetima na rotoru izvršena je uporedna analiza uticaja širine otvora statorskog žleba na pomenute performanse motora.

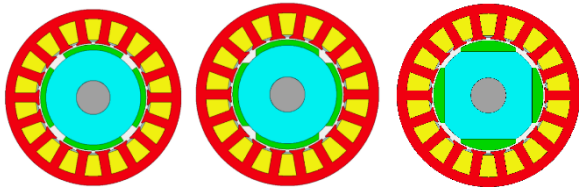
**2. TIPIČNE KONSTRUKCIJE SMSM**

U zavisnosti od načina postavljanja stalnih magneta na rotoru, SMSM se mogu podeliti na sinhronne mašine sa površinski postavljenim i na one sa magnetima utisnutim u rotor.

Kod sinhronih mašina sa površinski postavljenim magnetima, magneti su pričvršćeni na obod rotora. Različite magnetne provodnosti u dva međusobno upravna smera, odnosno dve električno ortogonalne ose dovode do magnetne asimetrije. Te dve ose se nazivaju podužna (direktna)  $d$  osa i poprečna  $q$  osa. Podužna i poprečna induktivnost,  $L_d$  i  $L_q$ , su približno jednake jer nema izraženog efekta isturenosti polova.

Prednost konstrukcije sinhronne mašine sa površinski postavljenim magnetima je to što im je jednostavna montaža. Nedostatak ovako konstruisane mašine je to što je magnet više izložen demagnetišućem polju i centrifugalnim silama. Takođe, ovakve mašine nisu pogodne za pogone kod kojih se zahtevaju velike brzine obrtanja.

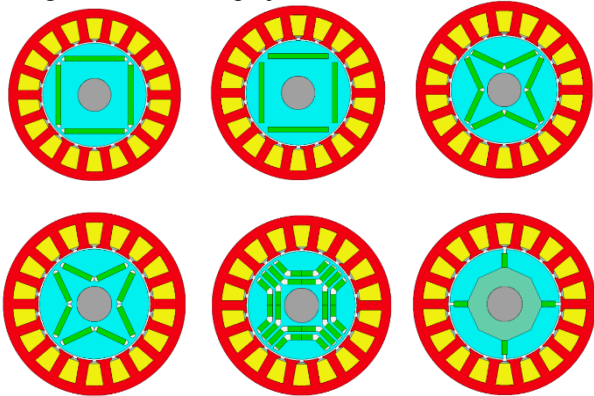
Na slici 1 prikazani su primeri topologije sinhronih motora sa površinski postavljenim stalnim magnetima na rotoru. Svaku od topologija odlikuje različit oblik stalnih magneta, što utiče na način njihovog fiksiranja za rotor, odnosno cenu njihove izrade.



Slika 1. Primeri topologija sa površinski postavljenim magnetima

Kod sinhronih mašina sa utisnutim stalnim magnetima magneti su dobro oklopljeni i zaštićeni, zbog čega su pogodni kod pogona koji zahtevaju veliki raspon brzina. Rotor ovako konstruisanih SMSM ima magnetnu anizotropiju zbog kompleksne geometrije. Sinhrona mašina sa utisnutim stalnim magnetima imaju izraženiju reakciju armature zbog manjeg vazdušnog zazora.

Na slici 2 prikazane su neke od topologija mašina sa utisnutim stalnim magnetima na rotoru. Ovakvom izradom postiže se robusna mehanička konstrukcija, a za izradu rotora je potrebna znatno manja količina gvožđa u  $d$  osi, zbog čega je induktivnost  $L_d$  mnogo manja od induktivnosti  $L_q$ . Postoji zavisnost induktivnosti statora od ugla rotora što dovodi do pojave reluktantnog momenta, koji predstavlja dodatnu komponentu koja se superponira na osnovni momenat, omogućavajući ovakvom tipu mašina veću gustinu momenta po jedinici mase.

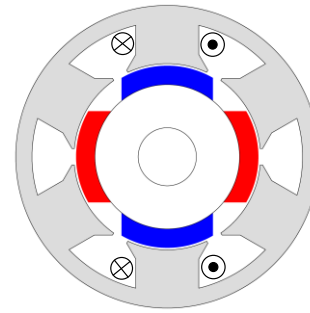


Slika 2. Primeri topologija sa utisnutim stalnim magnetima

Uloga statorskih namotaja jeste da u vazdušnom zazoru mašine osigura magnetno polje. Topologija statora kod oba navedena tipa mašina podrazumeva dve osnovne vrste namotaja: koncentrični namotaj i raspodeljeni namotaj.

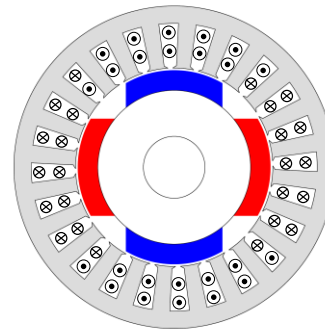
Kod koncentričnog namotaja provodnici su smešteni oko istaknutog pola u jedan veliki žleb. Koncentrični namotaj je manji, jednostavniji i ima manje gubitke u bakru namotaja. Ovakav namotaj daje maksimalni iznos polja (veći nego raspodeljeni namotaj) koje nije sinusnog karaktera usled čega se javljaju viši harmonici.

Na slici 3 prikazana je topologija koncentričnog statorskog namotaja, za slučaj četvoropolne mašine sa površinski postavljenim stalnim magnetima. Ovakav tip namotaja zahteva statorske žlebove velikog poprečnog preseka, te se stoga tipično izrađuje sa malim brojem žlebova. Najčešće je reč o konstrukciji sa necelim brojem žlebova po polu i fazi. Zbog velike površine koju zauzima žleb, zupci statora moraju imati velika proširenja na svojim vrhovima, kako se ne bi narušila ravnomernost zazora.



Slika 3. Primer koncentričnog namotaja četvoropolne mašine sa površinski postavljenim magnetima

Kod raspodeljenog namotaja provodnici su raspoređeni u više žlebova ispod jednog pola. Imaju bolju sinusnu raspodelu polja u vazdušnom zazoru usled čega imaju manji uticaj viših harmonika. Za raspodeljeni namotaj potrebna je veća količina bakra, zbog čega su gubici u bakru veći nego kod koncentričnog namotaja. Na slici 4 prikazana je topologija raspodeljenog trofaznog namotaja statora na primeru četvoropolne mašine sa površinski postavljenim magnetima.



Slika 4. Primer raspodeljenog namotaja četvoropolne mašine sa površinski postavljenim magnetima

### 3. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata je grafo-numerička metoda koja predstavlja izuzetno moćno sredstvo za izračunavanje fenomena u elektromagnetnom polju koje se uspostavlja u sredinama složene geometrije. Rotacione električne mašine upravo predstavljaju takve uređaje, pa je primena ove metode u analizi njihovog ponašanja sve zastupljenija. Postoje različite implementacije ove metode, u zavisnosti od problema koji se želi istražiti, a najzastupljenija je ona koja se temelji na rešavanju parcijalnih diferencijalnih jednačina magnetskog vektor potencijala  $A$ .

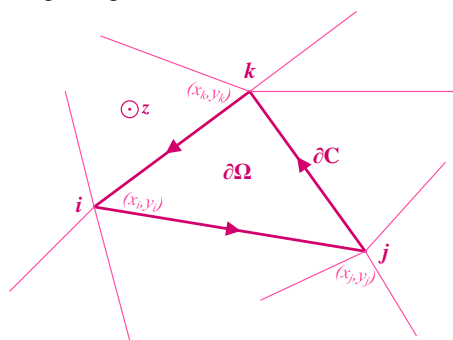
U zavisnosti od nivoa detaljnosti koji se želi postići, postoje dvodimenzionalne i trodimenzionalne implementacije ove metode. Iskustvo pokazuje da je za širok spektar problema najčešće dovoljno formulisati dvodimenzionalni problem metode konačnih elemenata, naročito za probleme koji nemaju izraženu varijaciju geometrije duž treće dimenzije (u slučaju rotacionih mašina treća dimenzija predstavlja osnu dužinu, kojom se definiše dužina paketa limova). U tom slučaju domen od interesa predstavlja planarnu površ poprečnog preseka magnetnog kola mašine, a konačni elementi na koje se poprečni presek izdružuje postaju trougani.

Dvodimenzionalna formulacija metode konačnih elemenata u kojoj je planarna površ poprečnog preseka mašine postavljena u  $xy$  ravni prerasta u parcijalnu diferencijalnu jednačinu u kojoj magnetski vektor potencijal  $A$  ima samo  $z$  komponentu. Relacija koja se može definisati na nivou pojedinačnog konačnog elementa tada glasi:

$$\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = -J_{0izv} + \sigma \left( \frac{\partial A_z}{\partial t} + grad_z V \right) \quad (1)$$

U relaciji  $\mu \left[ \frac{H}{m} \right]$  predstavlja permeabilnost, a  $\sigma \left[ \frac{S}{m} \right]$  predstavlja provodnost sredine kojoj konačni element pripada.

Član  $J_{0izv} \left[ \frac{A}{m^2} \right]$  predstavlja gustinu struje strujnih izvora (ukoliko takvih izvora ima u samom konačnom elementu),  $V[V]$  je električni skalar potencijal, dok  $A_z \left[ \frac{Wb}{m} \right]$  predstavlja pomenutu  $z$  komponentu magnetskog vektor potencijala. Na slici 5 je prikazan detalj jednog konačnog elementa trougaonog oblika.



Slika 5. Detalj konačnog elementa trougaonog oblika

Relacija 1 se nizom matematičkih transformacija prevodi u integralnu jednačinu u kojoj se oblik rešenja forsira unapred definisanim funkcijama oblika trougaonih segmenata.

Za slučaj primene metode u magnetno linearnim sredinama sistem jednačina koje je potrebno formulisati za sve konačne elemente se može značajno brže rešiti nego u slučaju nelinearnih sredina, kada i sama permeabilnost koja u jednačinama figuriše zavisi od intenziteta polja u čijem rešavanju učestvuje kao promenljivi parametar.

Otuda se metoda konačnih elemenata u primeni rešavanja elektromagnetnih polja u električnim mašinama smatra daleko najzahtevnijom metodom sa aspekta računarskih resursa, ali i utroška vremena, budući da se praktično sve rotacione mašine izrađuju od feromagnetskih materijala, koji su izuzetno magnetno nelinearni.

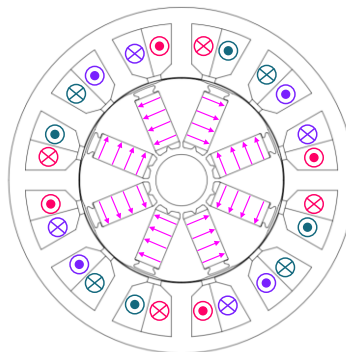
Na osnovu izloženog o metodi konačnih elemenata se može zaključiti da je opravdanost njene primene u direktnoj sprezi sa nivoom detaljnosti uvida u elektromagnetne fenomene u električnim mašinama. Tolika detaljnost se najčešće zahteva u početnim fazama projektovanja i konstrukcije električnih mašina, kada se istraživanjem određenih varijacija u konstrukciji želi odrediti koja će za rezultat dati najbolje performanse, spram unapred definisanih kriterijuma.

Upravo je varijacija konstrukcije i njen uticaj na performanse sinhronne mašine sa stalnim magnetima poslužila kao motiv za primenu metode konačnih elemenata u ovom radu.

#### 4. PRAKTIČAN PRIMER

U ovom poglavlju će se izvršiti analiza uticaja širine otvora statorskih žlebova na talasne oblike indukovanih elektromotornih sila praznog hoda i talasnost parazitivnog momenta sinhronih motora sa utisnutim i poprečno namagnetisanim stalnim magnetima. Kao osnov za analizu će poslužiti motor originalne konstrukcije, kao i njegove dve varijacije koje su izvedene isključivo na nivou simulacionih modela, a predstavljaju modifikaciju originalne konstrukcije sa aspekta promene širine otvora statorskog žleba.

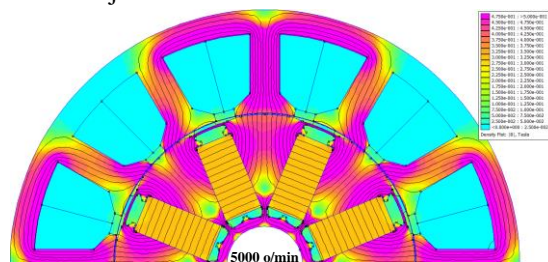
Za motor originalne konstrukcije postoje detaljni kataloški podaci, na osnovu kojih se mogu izraditi odgovarajući FEA modeli. Motor je osmopolni, trofazni, sa koncentričnim statorskim namotajima načinjenim od aluminijuma. Sprega namotaja je zvezda, za nominalni napon od 200 V. Spoljašnji prečnik statorskog lim paketa iznosi 102 mm. Dužina lim paketa razmatranog motora iznosi 35 mm. Utisnuti stalni magneti su izrađeni od ferita. Nominalna brzina obrtanja motora je 5000 o/min.



Slika 6. Izgled poprečnog preseka motora

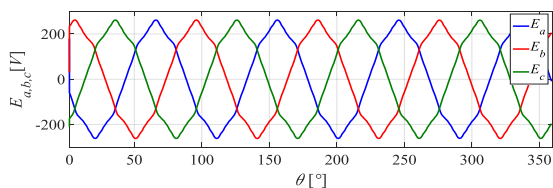
Na slici 6 je prikazan poprečni presek lim paketa analizirane mašine sa principskom dispozicijom statorskog trofaznog namotaja. Reč je o poprečnom preseku originalne mašine, kojoj otvor statorskog žleba iznosi 4 mm.

Jednostavnim modifikacijama u nekom od programa za crtanje su načinjene i dve pomenute varijacije širine ovog otvora, od 2 i 6 mm. Nad modelom motora, kreiranim u programskom paketu FEMM 4.2. su zatim izvršene magnetostatičke simulacije, kojima se oponaša rad motora u režimu idealnog praznog hoda pri brzini od 5000 o/min. Kao odziv ovih simulacija se dobijaju vrednosti vektora magnetske indukcije u svakom od konačnih elemenata, koje se zatim koriste za proračun fluksnih obuhvata i indukovanih elektromotornih sila statorskih namotaja, odnosno određivanje talasnosti parazitivnog momenta. Na slici 7 je prikazan odziv magnetostatičke simulacije kojom se oponaša rad motora u režimu praznog hoda pri brzini obrtanja od 5000 o/min.

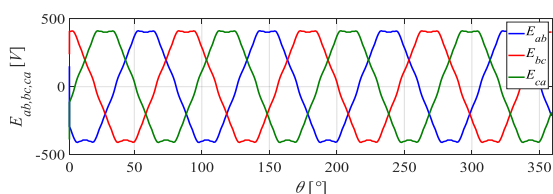


Slika 7. Simulacija za brzinu obrtanja 5000 o/min

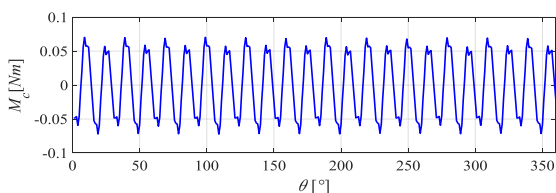
Na slikama 8-16 prikazani su talasni oblici faznih i međufaznih elektromotornih sila praznog hoda, kao i talasnost parazitivnog momenta, za pomenute tri različite širine otvora statorskih žlebova.



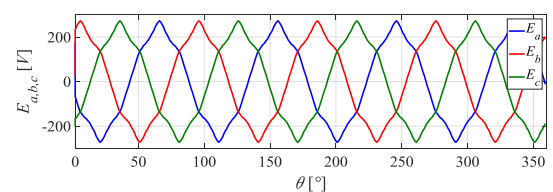
Slika 8. Elektromotorne sile u sve tri faze – otvor 4 mm



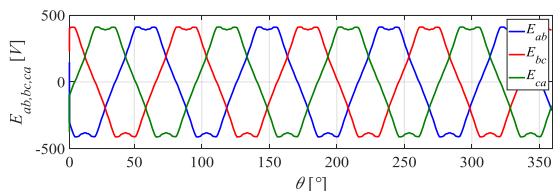
Slika 9. Međufazne elektromotorne sile – otvor 4 mm



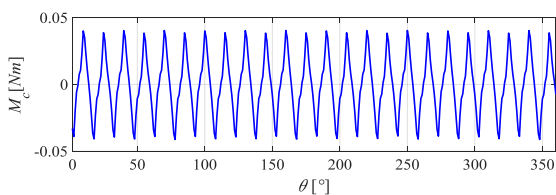
Slika 10. Talasnost parazitivnog momenta – otvor 4 mm



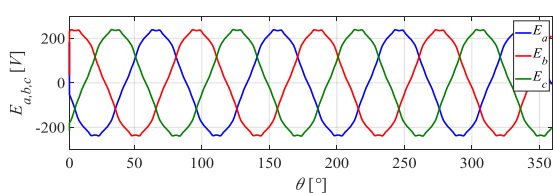
Slika 11. Elektromotorne sile u sve tri faze – otvor 2 mm



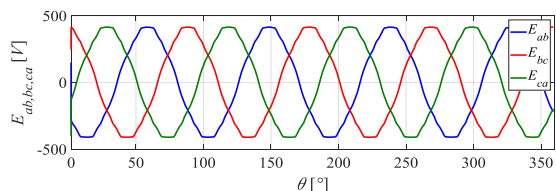
Slika 12. Međufazne elektromotorne sile – otvor 2 mm



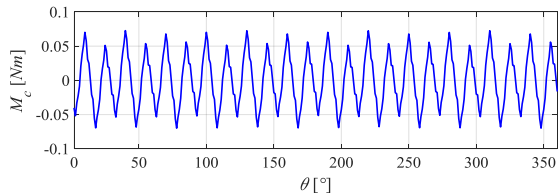
Slika 13. Talasnost parazitivnog momenta – otvor 2 mm



Slika 14. Elektromotorne sile u sve tri faze – otvor 6 mm



Slika 15. Međufazne elektromotorne sile – otvor 6 mm



Slika 16. Talasnost parazitivnog momenta – otvor 6 mm

Uporednom analizom prikazanih odziva se jasno uočava uticaj širine otvora statorskog žleba na talasne oblike razmatranih veličina. Uži otvor smanjuje talasnost parazitivnog momenta, ali izobličuje indukovane napone, dok je kod šireg otvora situacija obrnuta.

Očito da je nužno usvojiti rešenje koje predstavlja kompromis između ova dva sučeljena zahteva, što i predstavlja praktično usvojeno rešenje sa širinom od 4 mm.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane različite topologije konstrukcije sinhronih mašina sa stalnim magnetima. Na praktičnom primeru, primenom metode konačnih elemenata je izvršena uporedna analiza uticaja varijacije širine otvora statorskog žleba na veličine u režimu praznog hoda. Ustanovljen je značajan uticaj ovog geometrijskog parametra, što navodi na zaključak da se o njemu u fazi konstrukcije mašina mora posebno povesti računa.

## 6. LITERATURA

- [1] Nidec Motor, S102F, Summary results, Nidec Sole Motor Corporation.
- [2] Venco Čorluka, „Modeliranje sinkronog motora s unutarnjim permanentnim magnetima i koncentriranim namotom“, doktorski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017.
- [3] Besplatni, nekomercijalni softver FEMM 4.2 dostupan na veb stranici [www.femm.info](http://www.femm.info).
- [4] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Springer US, 1995, pp. 1–16.

### Kratka biografija:

**Milica Marković** rođena je u Zrenjaninu, 1997. godine. Diplomirala je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2020. godine. Master rad iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2021. godine.

**Dejan Jerkan** je docent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su mu modelovanje i dijagnostika električnih mašina, kao i metoda konačnih elemenata.