



UTICAJ MATERIJALA NA UNAPREĐENJE PERFORMANSI KAVEZNIH ASINHRONIH MAŠINA MATERIALS INFLUENCE ON IMPROVEMENT OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MACHINES PERFORMANCE

Aleksandra Kovačević, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj U radu je izložena metoda konačnih elemenata i mogućnosti njene primene u analizi električnih mašina. Predstavljen je model trofaznog kaveznog asinhronog motora izrađenog pomoću softverskog alata koji implementira metodu konačnih elemenata. Analizirane su statičke i dinamičke karakteristike, u smislu uticaja materijala upotrebljenih za izradu rotorskog kaveza. Fokus je na upoređivanju performansi dve izvedbe mašine, kod kojih su upotrebljeni različiti materijali za izradu kaveznog namotaja (bakar i aluminijum).

Ključne reči: Asinhroni motor, Metoda konačnih elemenata, Kavezni rotor, Bakar, Aluminijum

Abstract This paper presents the finite element method and the possibilities of its application in the analysis of electrical machines. A model of a three-phase squirrel-cage induction motor made using a software tool that implements the finite element method is presented. Static and dynamic characteristics were analyzed, in terms of the influence of the materials used to make the rotor cage. The focus is on comparing the performance of two versions of the machine, in which different materials were used to make the cage winding (copper and aluminum).

Keywords: Induction motor, Finite element method, Squirrel cage, Copper, Aluminium

1. UVOD

Električne mašine su ključni elementi u svim segmentima elektroenergetskog sistema (EES): proizvodnji, prenosu, distribuciji i potrošnji električne energije. Zbog svoje jednostavnosti i ekonomičnosti, robusnosti i sigurnosti, niske potrebe za održavanjem i otpornosti na preopterećenje, asinhroni motori preuzimaju veliki udeo kao pogonski motori, a danas se u industriji, poljoprivredi, domaćinstvima i sl. pojavljuju u više od 90% slučajeva.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, vanr.prof.

konstantno se radi na usavršavanju asinhronih motora. Zbog široke primene, konstrukcija i izbor materijala rotora asinhronih mašina, utiču na više faktora od kojih je najizraženiji cena, a sama konstrukcija zavisna je od uslova pod kojim motor radi, vrste pogona, načinu pokretanja motora, nominlanih parametara.

2. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata je izvedena iz opšte teorije elektromagnetnih polja, uvođenjem određenih pomoćnih vektorskih i električnih veličina koje su poznate pod nazivom potencijali elektromagnetnog polja. Strogo uzevši, potencijali elektromagnetskih polja se analitički mogu uvesti i izraziti jedino u homogenim sredinama, ali je upotrebom numeričkih metoda mogućnost njihove primene proširena na praktično sve oblasti proučavanja makroskopskih polja, koja se vrlo često uspostavljaju u sredinama koje se ne mogu smatrati niti homogenim, niti linearnim, a vrlo često ni izotropnim. Za izradu magnetskih kola električnih mašina se koriste nelinearni feromagnetski materijali, a osnovi razlog za njihovu primenu je velika relativna permeabilnost (permeabilnost feromagnetskih materijala je izuzetno složena veličina, koja je zavisna od intenziteta magnetskog polja, brzine promene izvora polja, a u slučaju anizotropnih materijala i pravca i smera magnetnog polja).

Za opisivanje elektromagnetnih polja u sredinama proizvoljnih karakteristika i proizvoljne konfiguracije izvora koriste se Maksimalne jednačine i jednačina kontinuiteta u integralnom obliku:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.1)$$

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \left(\vec{J}_{izv} + \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s} \quad (2.2)$$

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_v \rho dv \quad (2.3)$$

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2.4)$$

$$\oint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho dv \quad (2.5)$$

Primenom operatora prostornog diferenciranja na date Maksvelove jednačine u integralnom obliku (uz primenu poznatih teorema vektorske analize, kao što su Stoksova i teorema Gaus-Ostrogradskog, dolazi se do njihovog diferencijalnog oblika, datog relacijama (2.6)-(2.9).

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

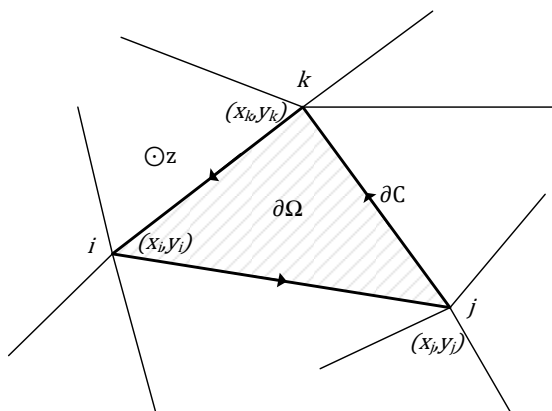
$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_{izv} + \vec{J} \quad (2.7)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (2.9)$$

2.1 Formulacija metode konačnih elemenata u dvodimenzionalnom domenu

Domen integracije predstavlja površ jednog od mnoštva konačnih elemenata na koje je izdijeljena cela oblast od interesa. Pošto je oblast dvodimenzionalna, konačni elementi mogu biti mnogouglovi, ali je najčešći slučaj da se usvajaju segmenti trougaonog oblika. Umesto kontinualnog problema, metoda konačnih elemenata ima za cilj rešavanje magnetskog vektor potencijala u temenima, odnosno čvorovima mreže trougaonih segmenata, dok se vrednost potencijala u proizvoljnim tačkama unutar segmenta dobija interpolacijom vrednosti potencijala u čvorovima. Ako se oblast izdijeli na konačne elemente dovoljno gusto, tako da se ne gubi značajno na preciznosti metode, često je dovoljno usvojiti da se vrednost potencijala unutar segmenta dobije linearnom interpolacijom potencijala čvorova.



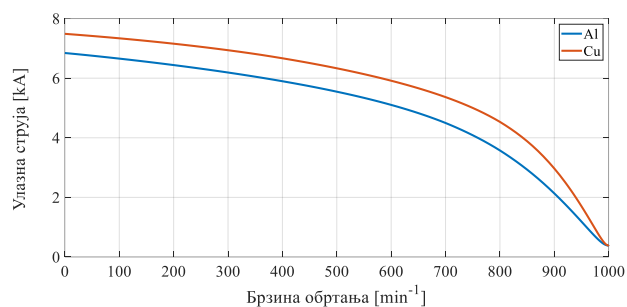
Slika 2.1 Konačni element u obliku trougaonog segmenta

3. UTICAJ MATERIJALA PROVODNIKA ROTORA NA PERFORMANSE MOTORA

Kod asinhronih motora sa kavezom rotorom postoji važan izbor između upotrebe jeftinijeg, kaveza izrađenog od aluminijuma u odnosu na skuplji kavez u vidu bakarnih štapova. Korišćenje neadekvatne konstrukcije rotora može nepotrebno povećati gubitke, odnosno troškove ili dovesti do kvara samog asinhronog motora.

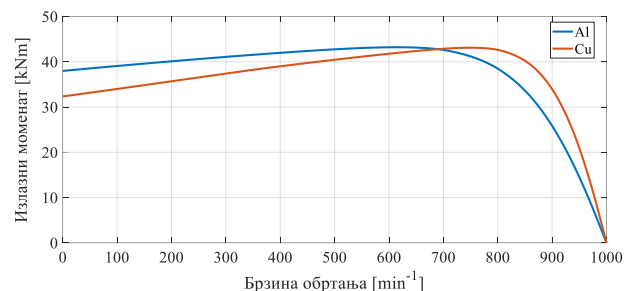
Razmatra se trofazni šestopolni asinhroni motor, čiji je model izrađen pomoću softverskog paketa koji implementira metodu konačnih elemenata. Izlazna snaga motora iznosi 1250W, nazivnog napona 500V, čiji su

namotaji spregnuti u trougao. Data brzina obrtanja iznosi 992 o/min, nominalna učestanost 50Hz. Opterećenje je konstante snage, a radna temperatura 75°C.



Slika 3.1 Statička karakteristika ulazne struje motora

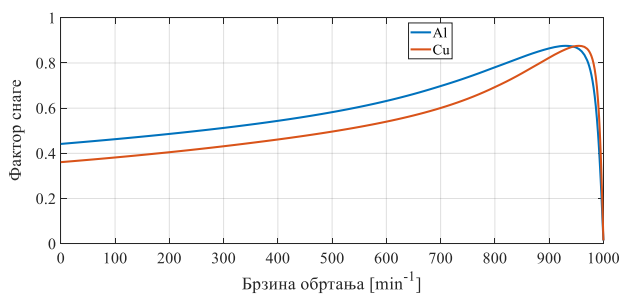
Na slici 3.1 prikazana je statička karakteristika ulazne struje motora, odakle se jasno može uočiti da je struja motora sa kavezom rotorom izrađenog od bakarnih štapova veća u odnosu na struju motora sa kavezom izrađenog od aluminijumskih šipki. Razlog leži u znatno većoj otpornosti aluminijuma u odnosu na bakar.



Slika 3.2 Statička karakteristika izlaznog momenta motora

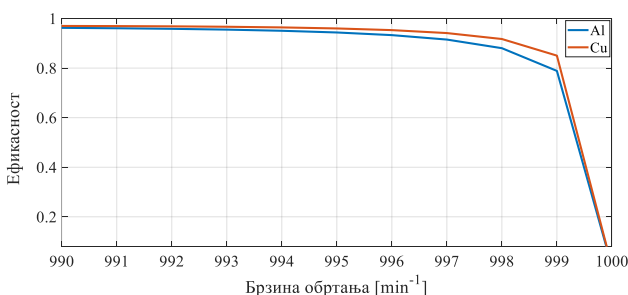
Na slici 3.2 prikazana je statička karakteristika izlaznog momenta motora, koja se može analizirati iz dve perspektive. Najpre, na prelaznom delu, kako polazni momenat zavisi od otpora, polazni momenat motora sa aluminijumskim kavezom je veći u odnosu na polazni momenat motora sa kavezom izrađenog od bakarnih štapova, što čini razliku ali ne i presudnu s obzirom da se danas mašine ne pokreću toliko često direktno iz mreže. Dakle, u pogledu izlaznog momenta u prelaznom delu, prednost bakra u odnosu na aluminijum nije ekskluzivna. Međutim, na linearnom delu karakteristike, razlike su veće i značajnije. Naime, prevalno klizanje motora sa aluminijumskim kavezom je veće od prevalnog klizanja motora sa kavezom izrađenog od bakarnih štapova. Dakle, korišćenjem bakarnih štapova prilikom izrade rotora postižu se manji gubici, kako zbog manje vrednosti klizanja, tako i zbog samih osobina bakra.

Na slici 3.3 prikazana je zavisnost faktora snage od brzine obrtanja prilikom korišćenja aluminijuma, odnosno bakra kao materijala od kog su izrađeni štapovi rotora.



Slika 3.3 Zavisnost faktora snage motora u odnosu na brzinu obrtanja

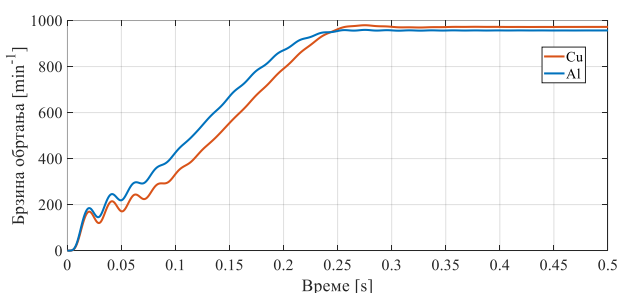
Prilikom pokretanja, faktor snage je bolji kod aluminijumskog, ali nema značajnih razlika u odnosu na rotor izrađen od bakarnih štapova.



Slika 3.4 Zavisnost efikasnosti od brzine obrtanja

Na slici 3.4 prikazana je zavisnost efikasnosti motora od brzine, pri čemu se značajnije razlike mogu uočiti u poslednjim tačkama analiziranog intervala, gde se primećuje povećanje efikasnosti korišćenjem bakarnih štapova.

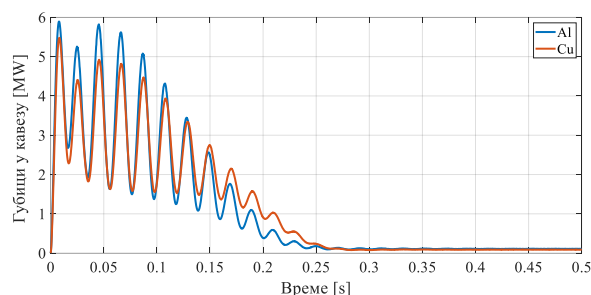
Na slikama datim u nastavku biće predstavljena uporedna analiza dinamičkih karakteristika, za rotor sa aluminijumskim i za rotor sa bakarnim štapovima.



Slika 3.5 Promena brzine tokom vremena

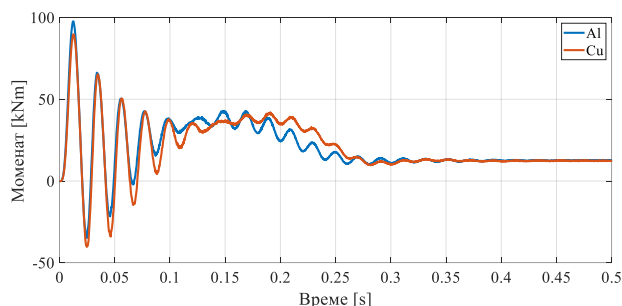
Na slici 3.5 prikazana je promena brzine obrtanja motora tokom prve polovine sekunde simulacije. Sa datog grafika očitana je prevalna brzina za bakarnu izvedbu $n_{pr} = 978,9 \text{ min}^{-1}$, koja je veća za oko 2% od prevalne brzine koju ova mašina dostiže prilikom izrade rotorskog kaveza od aluminijuma, iz čega proističe da je prevalno klizanje u slučaju upotrebe aluminijuma duplo veće od prevalnog klizanja u slučaju upotrebe bakra kao materijala od kog je izrađen rotorski kavez, što je u saglasnosti sa činjenicom

da je otpornost aluminijuma značajno veća od otpornosti bakra.

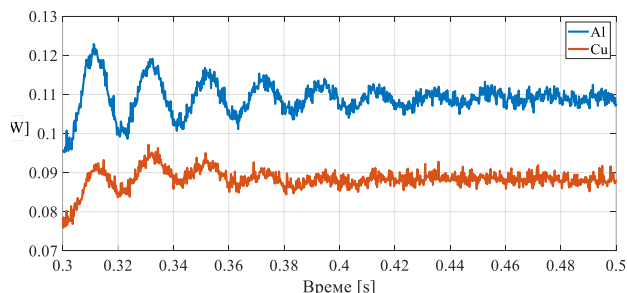


Slika 3.6 Promena gubitaka u kavezu tokom vremena

Na slici 3.6 predstavljena je promena snage gubitaka u kavezu tokom prvih 0,5s, sa izdvojenim detaljem ustaljenog perioda između 0,3s i 0,5s. Uočava se da su gubici u kavezu rotora veći prilikom korišćenja aluminijuma, kako tokom prelaznog perioda, tako i u ustaljenom stanju, odakle se očitava razlika između gubitaka u slučaju upotrebe ova dva materijala i iznosi oko 20,5kW na stranu aluminijuma. Dakle, prilikom odabira bakra inicijalni troškovi jesu veći, ali dugoročno gledano oni su manji zbog značajno manje snage gubitaka koja se ostvaruje u kavezu rotora prilikom korišćenja bakra, što ide u prilog energetske efikasnosti koju treba ostvariti.



Slika 3.7 Promena momenta tokom vremena



Slika 3.8 Promena momenta tokom vremena – ustaljeni period

Na slici 3.7 i slici 3.8 prikazane su promene momenta tokom vremena. Uočavaju se odstupanja koja postoje u dinamičkom periodu zbog odnosa otpornosti i reaktanse koji se razlikuje. U saglasnosti sa statičkom karakteristikom, prilikom upotrebe aluminijuma se prvo dostiže prevalni momenat, dok je većim delom izlazni momenat bakarne izvedbe veći u odnosu na momenat koji

se postiže upotrebom aluminijumskog kaveza, što se slaže sa činjenicom da se povećavanjem otpora rotorskog namotaja, izlazni momenat smanjuje.

4. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran trofazni jednokavezni asinhroni motor čiji je model izrađen upotrebom softvera koji implementira metodu konačnih elemenata. U prvoj varijaciji, rotor kaveza konstruisan je od aluminijumskih štapova, a u drugoj od bakarnih. Prilikom uporedne analize dobijenih karakteristika, zaključuje se da bakarni kavez, iako je skuplji pruža unapređenje performansi u pogledu većeg polaznog momenta. Kako je prevalno klizanje motora sa aluminijumskim kavezom veće od prevalnog klizanja motora sa kavezom izrađenog od bakarnih štapova zaključuje se da se korišćenjem bakarnih štapova prilikom izrade rotora postižu manji gubici, kako zbog manje vrednosti klizanja, tako i zbog samih osobina bakra. Na osnovu dobijenih rezultata i urađene analize, zaključuje se da u realizacijama gde je efikasnost ključna, bakar zbog manje snage gubitaka predstavlja bolji izbor. Zbog veće provodljivosti, izlazni momenat je veći u bakarnoj nego aluminijumskoj izvedbi. Bakar može bolje podneti veću struju bez pregrevanja zbog svoje bolje provodljivosti što je naročito bitno u aplikacijama sa visokim startnim ili radnim trenutkom. Takođe, štapovi izrađeni od bakra mogu izdržati više temperature pre nego što dođe do značajnog gubitka provodljivosti, što je ključno u uslovima visokih opterećenja

5. LITERATURA

- [1] Slobodan N. Vukosavić, „*Električne mašine*“, Beograd, 2010.
- [2] Tihomir Latinović, Miroslav Prša, „*Osnovi elektrotehnike i električnih mašina*“, Banja Luka, 2013.
- [3] Ion Boldea, Syed A. Nasar, „*The Induction Machines Design Handbook*“-second edition, 2002.
- [4] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, „*Design of Rotating Electrical Machines*“, 2008.
- [5] Austin Hughes, „*Electric Motors and Drives*“-third edition, 1993.
- [6] Veran Vasić, Đura Oros, „*Uvod u električne mašine-skripta*“, Novi Sad, 2018.
- [7] Jožef Varga, „*Analitički metod za sračunavanje karakteristika trofaznih asinhronih motora*“, Subotica.
- [8] Jožef Varga, „*Električne mašine II*“, Subotica, 2006.
- [9] „*Niskonaponski asinhroni motori*“ – Sever-katalog, Subotica, 1979.

Kratka biografija:



Aleksandra Kovačević rođena je u Kikindi 2001. godine. Diplomirala je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2023. godine. Master rad iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2024. godine.

kontakt:
aleksandra.kovacevic02@gmail.com



Dejan Jerkan je vanredni profesor 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.